



TESIS (TL142501)

STUDI PENGARUH TEMPERATUR DAN WAKTU  
*CURING* TERHADAP SIFAT FISIK-MEKANIK SEMEN  
GEOPOLIMER BERBASIS *SLAG FERRONICKEL*

YULIANTI MALIK

NRP. 2714201014

Dosen Pembimbing  
Sungging Pintowantoro, ST., MT., Ph.D

PROGRAM PASCA SARJANA  
JURUSAN TEKNIK MATERIAL DAN METALURGI  
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA  
2016

*(halaman ini sengaja dikosongkan)*



THESIS (TL142501)

# STUDY EFFECT OF CURING TEMPERATURE AND TIME TO PHYSICAL-MECHANICAL PROPERTIES OF FERRONICKEL SLAG-BASED GEOPOLYMERS CEMENT

YULIANTI MALIK

NRP. 2714201014

ADVISOR

Sungging Pintowantoro, ST., MT., Ph.D

MAGISTER PROGRAM

MATERIALS AND METALLURGICAL ENGINEERING

FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY

INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER

SURABAYA

2016

*(halaman ini sengaja dikosongkan)*

## LEMBAR PENGESAHAN TESIS

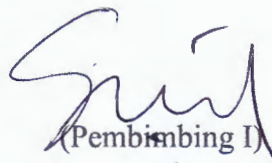
Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar  
Magister Teknik (M.T) di Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :  
Yulianti Malik  
2714201014

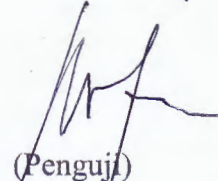
Tanggal Ujian : 21 Juli 2016  
Periode Wisuda : Semester Genap 2015/2016

Disetujui oleh :

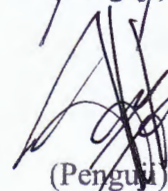
1. Sungging Pintowantoro, ST., MT., Ph.D  
NIP. 196809302000031001

  
(Pembimbing I)

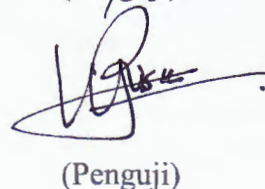
2. Mas Irfan P. Hidayat, ST., MSc.Ph.D  
NIP. 197810272003121001

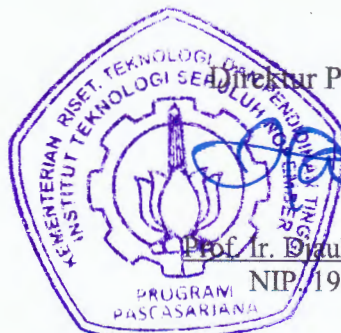
  
(Penguji)

3. Dr. Agung Purniawan, ST., M.Eng  
NIP. 197605282002121003


  
(Penguji)

4. Dr. Ing. Victor Y. Risonata, ST., M.Sc

  
(Penguji)



Direktur Program Pascasarjana,

  
Prof. Ir. Djuhar Manfaat, M.Sc., Ph.D  
NIP. 196012021987011001

# **STUDI PENGARUH TEMPERATUR DAN WAKTU *CURING* TERHADAP SIFAT FISIK – MEKANIK SEMEN GEOPOLIMER BERBASIS *SLAG FERRONICKEL***

Nama Mahasiswa : Yulianti Malik  
NRP : 2714201014  
Dosen Pembimbing : Sungging Pintowantoro, ST., MT., Ph.D

## **ABSTRAK**

Slag merupakan limbah padat yang masih mengandung beberapa unsur mineral seperti Si dan Al sehingga dapat dimanfaatkan sebagai bahan dalam pembuatan semen yang dikenal sebagai semen geopolimer melalui proses geopolimerisasi. Dalam proses geopolimerisasi beberapa parameter digunakan untuk memperbaiki sifat fisik dan sifat mekanik geopolimer salahsatunya adalah temperatur dan waktu curing. Pada penelitian ini telah dilakukan sintesis geopolimer berbahan dasar slag ferronickel dan (NaOH 7 M + Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> 1,3 M) sebagai pelarut dengan variasi temperatur curing 50, 70 dan 90 °C dan waktu curing 12 dan 24 jam yang bertujuan untuk menganalisa pengaruh temperatur dan waktu curing terhadap sifat fisik-mekanik dan mikrostruktur geopolimer. Dari hasil penelitian diperoleh bahwa nilai uji serapan air berdasarkan ASTM C-1403 mengalami peningkatan seiring dengan meningkatnya temperatur dan waktu *curing*, demikian pula dengan nilai densitas mortar berdasarkan ASTM C 905-01, sementara nilai densitas semen geopolimer berdasarkan ASTM C-188 diperoleh nilai maksimum pada temperatur curing 70 °C dengan waktu curing 24 jam sebesar 3,105 g/cm<sup>3</sup>. Kuat tekan berdasarkan ASTM C-109 juga diperoleh nilai maksimum pada temperatur 70 °C dengan waktu curing 24 jam sebesar 12,16 MPa dengan mikrostruktur permukaan yang lebih merata dibanding pada temperatur lainnya. Pada temperatur yang lebih rendah (50 °C) nilai kuat tekan menurun akibat proses polikondensasi yang tidak sempurna sehingga mengakibatkan adanya retakan mikro pada geopolimer sedangkan pada temperatur yang lebih tinggi (90 °C) geopolimer menjadi keropos akibat banyaknya pori dengan ukuran diameter yang besar sehingga menurunkan nilai kuat tekan yang dilihat berdasarkan hasil pengamatan SEM.

*Kata kunci : slag ferronickel, semen geopolimer, temperatur dan waktu curing.*

*(halaman ini sengaja dikosongkan)*

# **STUDY EFFECT OF CURING TEMPERATURE AND TIME TO PHYSICAL-MECHANICAL PROPERTIES OF FERRONICKEL SLAG- BASED GEOPOLYMERS CEMENT**

Name : Yulianti Malik  
Student Identity Number : 2714201014  
Supervisor : Sungging Pintowantoro, ST., MT., Ph.D

## **ABSTRACT**

Slag is a solid waste which still contains some mineral elements such as Si and Al, so it can be used as an ingredient in the manufacture of cement known as a geopolymer cement through geopolymerization process. In the geopolymerization process, several parameters are used to improve the physical and mechanical properties of geopolymers, one of which is temperature and curing time. This study has been conducted based geopolymer synthesis of ferronickel and slag ( $\text{NaOH } 7 \text{ M} + \text{Na}_2\text{SiO}_3 \text{ } 1.3 \text{ M}$ ) as a solvent with a curing temperature variation of 50, 70 and 90 °C and the curing time 12 and 24 hours to analyze the effect of temperature and time curing the physical-mechanical properties and microstructure geopolymer. The result showed that the value of the test water uptake by ASTM C-1403 increased with temperature and curing time, as well as the density mortar based on ASTM C 905-01, while the density of cement geopolymer based on ASTM C-188 obtained maximum value at a temperature curing 70 °C with a 24-hour curing time of 3.105 g/cm<sup>3</sup>. Compressive strength by ASTM C-109 has also obtained the maximum value at a temperature of 70 °C with a 24-hour curing time of 12.16 Mpa with surface microstructures are more than the other temperature. At lower temperatures (50 °C) the compressive strength decreased due to the process of polycondensation imperfect causing their micro-cracks on geopolymer whereas at higher temperatures (90 °C) geopolymer become brittle due to the many pores with a diameter that is large so that the lower value compressive strength is seen by the SEM observation.

*Keywords: ferronickel slag, geopolymers cement, temperature and curing time.*



*(halaman ini sengaja dikosongkan)*

## DAFTAR ISI

	Hal
Halaman Judul .....	i
Lembar Pengesahan .....	iii
Abstrak .....	v
Abstract .....	vii
Kata Pengantar .....	ix
Daftar Isi .....	xi
Daftar Gambar .....	xiii
Daftar Tabel .....	xv

### BAB 1 PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah .....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	3
1.3 Batasan Masalah .....	3
1.4 Tujuan .....	4
1.5 Manfaat .....	4

### BAB 2 KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 Kajian Pustaka .....	5
2.2 Dasar Teori .....	11
2.2.1 Semen .....	11
2.2.2 Semen Geopolimer .....	13
2.2.3 Geopolimer .....	17
2.2.4 Sintesis Geopolimer .....	18
2.2.5 Sifat-Sifat Geopolimer .....	22
2.2.6 Aplikasi Geopolimer .....	24
2.2.7 Prekursor Geopolimer .....	25
2.2.8 <i>Slag</i> (Terak) .....	28
2.2.9 <i>Slag Ferronickel</i> .....	29
2.2.10 Larutan Alkalin (Aktivator) .....	31
2.2.11 Natrium Silikat ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) .....	32
2.2.12 Natrium Hidroksida ( $\text{NaOH}$ ) .....	34

### BAB 3 METODA PENELITIAN

3.1 Alat dan Bahan .....	35
3.2 Prosedur Eksperimen .....	35
3.3 Pengujian dan Karakterisasi Sampel .....	38
3.3.1 Uji Serapan Air ( <i>Water Absorption</i> ) .....	38

3.3.2 Uji Densitas (Kerapatan/Kepadatan).....	39
3.3.3 Uji Tekan ( <i>Compressive Strength</i> ).....	41
3.3.4 <i>X-Ray Diffraction</i> (XRD).....	43
3.3.5 Pengujian <i>Fourier Transform Infra Red</i> (FTIR).....	45
3.3.6 Scanning Electron Microscope (SEM).....	47

#### **BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN**

4.1 Produk Geopolimer .....	49
4.2 Hasil Karakterisasi <i>X-ray Diffraction</i> (XRD).....	50
4.3 Hasil Karakterisasi <i>Fourier Transform Infra Red</i> (FTIR).....	53
4.4 Hasil Karakterisasi <i>Energy Dispersive X-Ray</i> (EDX) .....	55
4.5 Hasil Karakterisasi <i>Scanning Electron Microscope</i> (SEM) .....	58
4.6 Hasil Pengujian Serapan Air ( <i>Water Absorption</i> ) .....	64
4.7 Hasil Pengujian Massa Jenis ( <i>Density</i> ).....	66
4.8 Hasil Pengujian Kuat Tekan ( <i>Compressive Strength</i> ) .....	69
4.9 Pengaruh Temperatur dan Waktu <i>Curing</i> terhadap Sifat Fisik-Mekanik.....	72

#### **BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN**

5.1 Kesimpulan .....	75
5.2 Saran.....	76

<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>77</b>
-----------------------------	-----------

<b>LAMPIRAN .....</b>	<b>85</b>
-----------------------	-----------

## DAFTAR GAMBAR

	Hal
Gambar 2.1 Perbedaan Proses Reaksi selama <i>Curing</i> antara Semen Portland dan Semen Gepolimer .....	14
Gambar 2.2 Struktur Tiga Dimensi Polysialate dan Ikatan yang Terjadi dalam Geopolimer. ....	17
Gambar 2.3 Skematis Proses Pembentukan Geopolimer .....	19
Gambar 2.4 Kategori <i>slag</i> berdasarkan bentuk (a) <i>High Slag</i> (b) <i>Medium/Low Slag</i> .....	30
Gambar 2.5 <i>X-Ray</i> Difraktogram <i>Slag</i> Feronikel .....	30
Gambar 2.6 Perubahan Sifat Mekanik Geopolimer Akibat Perubahan Konsentrasi Natrium Silikat .....	33
Gambar 2.7 Perubahan Sifat Mekanik Geopolimer Akibat Perubahan Konsentrasi Natrium Hidroksida.....	34
Gambar 3.1 Diagram Alir Tahapan Penelitian .....	36
Gambar 3.2 Konfigurasi Spesimen Selama Pengujian (ASTM C1403) .....	38
Gambar 3.3 Pegujian Densitas Semen (ASTM C-188) .....	40
Gambar 3.4 Bagan Tipe Retakan (ASTM C 109) .....	42
Gambar 3.5 Skema Kerja <i>X-Ray Diffraction</i> (XRD) .....	43
Gambar 3.6 Ilustrasi Grafik Hasil Pengujian XRD .....	44
Gambar 3.7 Skema Pengujian FTIR (Saptari, V 2003) .....	45
Gambar 3.8 Mesin FTIR <i>Thermo Scientific</i> iS10.....	46
Gambar 3.9 Mekanisme Kerja dan Mesin <i>Scanning Electron Microscope</i> (SEM) .....	47
Gambar 4.1 Hasil Sintesis Geopolimer .....	49
Gambar 4.2 Hasil XRD <i>Slag Ferronickel</i> dan Geopolimer pada Beberapa Variasi Temperatur dan Waktu Curing .....	51
Gambar 4.3 Spektrum FTIR <i>Slag Ferronickel</i> dan Geopolimer pada Beberapa Variasi Temperatur dan Waktu Curing .....	54
Gambar 4.4 Hasil Pengujian EDX Sampel Geopolimer pada Temperatur 50 °C (a), 70 °C (b) dan 90 °C (c) .....	57

Gambar 4.5	Hasil SEM Sampel Geopolimer pada Temperatur 50 °C dengan Waktu <i>Curing</i> 12 jam pada perbesaran 100x (a), 1000x (b) dan 5000x (c) dan Waktu <i>Curing</i> 24 jam pada perbesaran 100x (d), 1000x (e) dan 5000x (f) .....	59
Gambar 4.6	Hasil SEM Sampel Geopolimer pada Temperatur 70 °C dengan Waktu <i>Curing</i> 12 jam pada perbesaran (a), 100x, (b) 1000x dan (c) 5000x dan Waktu <i>Curing</i> 24 jam pada perbesaran 100x (d), 1000x (e) dan 5000x (f) .....	61
Gambar 4.7	Hasil SEM Sampel Geopolimer pada Temperatur 90 °C dengan Waktu <i>Curing</i> 12 jam pada perbesaran (a), 100x, (b) 1000x dan (c) 5000x dan Waktu <i>Curing</i> 24 jam pada perbesaran 100x (d), 1000x (e) dan 5000x (f) .....	63
Gambar 4.8	Grafik Serapan Air Semen Geopolimer dengan Variasi Temperatur dan Waktu <i>Curing</i> .....	64
Gambar 4.9	Densitas Mortar Geopolimer Slag Ferronickel Berdasarkan ASTM 138/C 138M – 01a .....	66
Gambar 4.10	Densitas Semen Geopolimer Slag Ferronickel Berdasarkan ASTM C-188 .....	67
Gambar 4.11	Grafik Kuat Tekan Geopolimer pada Beberapa Variasi Temperatur dan Waktu <i>Curing</i> .....	69

## DAFTAR TABEL

	Hal
Tabel 2.1 Beberapa Penelitian tentang Hubungan Temperatur dan Waktu <i>Curing</i> terhadap Sifat Geopolimer .....	7
Tabel 2.2 Komponen Utama Semen Biasa/Semen Portland .....	11
Tabel 2.3 Klasifikasi Semen Portland Berdasarkan Komposisi Kimia .....	13
Tabel 2.4 Rentang Komposisi yang Lazim dari Semen Geopolimer dan Portland.....	15
Tabel 2.5 Sifat-Sifat Semen dan Binder Geopolimer .....	23
Tabel 2.6 Perbandingan Sifat Fisik antara Binder <i>Ordinary Portland Cement</i> (OPC), <i>Magnesium Phosphat Cements</i> (MPCs) dan Geopolimer .....	24
Tabel 2.7 Aplikasi Geopolimer Berdasarkan Rasio Si/Al .....	25
Tabel 2.8 Jenis Prekursor dan Sifat Geopolimer yang Terbentuk.....	28
Tabel 2.9 Komposisi Kimia Beberapa Tipe <i>Slag</i> (wt%).....	29
Tabel 2.10 Komposisi Kimia dan Laju Produksi <i>Slag</i> Feronikel.....	31
Tabel 3.1 Alat dan Bahan yang Digunakan untuk Sintesis Geopolimer .....	35
Tabel 3.2 Rancangan Penelitian yang akan dilakukan.....	36
Tabel 3.3 Informasi yang Dihasilkan dari Difraksi XRD .....	45
Tabel 4.1 Komposisi Unsur yang Terkandung dalam <i>Slag Ferronickel</i> .....	56
Tabel 4.2 Komposisi Oksida <i>slag ferronickel</i> .....	56

*(halaman ini sengaja dikosongkan)*

# **BAB 1**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1 Latar Belakang**

Sejak dikeluarkannya undang-undang (UU) Nomor 4 tahun 2009 tentang Pertambangan Mineral dan Batubara (Minerba), maka kini seluruh perusahaan pertambangan mineral diwajibkan untuk memurnikan hasil tambangnya di dalam negeri. Hal ini mendorong perusahaan pertambangan salah satunya industri pertambangan nikel untuk membangun atau menambah fasilitas *smelter* agar dapat memenuhi ketentuan dari UU tersebut. Banyaknya *smelter* yang dibangun selain dapat meningkatkan jumlah mineral murni juga menghasilkan bahan sisa dengan beberapa kandungan mineral di dalamnya berupa *slag*, bahkan sering kali jumlah *slag* cenderung lebih banyak dibandingkan dengan jumlah mineral murni yang dihasilkan (50 hingga 55%). Dalam industri pemurnian mineral *slag* masih dianggap sebagai limbah yang memiliki nilai ekonomi rendah, selain itu dengan beberapa kandungan unsur yang terdapat didalamnya seperti fosfat, borat, silfit, karbida dan halida yang tidak dapat direduksi dalam proses pemurnian maka dalam jangka waktu tertentu *slag* dapat menimbulkan masalah bagi lingkungan utamanya lingkungan di sekitar lokasi pertambangan terlebih lagi jika *slag* tidak dikelola dengan baik. Disisi lain dengan adanya beberapa kandungan unsur tersebut, *slag* menjadi potensial untuk dapat dikelola agar menjadi material yang lebih bermanfaat dan memiliki nilai ekonomi yang lebih tinggi.

Beberapa penelitian telah dilakukan dalam memanfaatkan *slag* agar dapat memiliki nilai jual yang lebih tinggi seperti pemanfaatan *slag* sebagai campuran bahan pembuatan jalan (Ibrahimi dkk, 2007), sebagai bahan campuran beton (Sakoi dkk, 2011 dan El Sahate dkk, 2014), sebagai *agregate* dan sebagai bahan campuran aspal (Wang, G, 2010). Akan tetapi hal tersebut belum mampu memberikan pengaruh yang signifikan terhadap nilai *slag* secara ekonomi. Salah satu penelitian mengenai pemanfaatan *slag* yang menarik untuk dikembangkan adalah pemanfaatan *slag* dalam industri pembuatan semen (Maragkos dkk, 2008; Komnitsas, K, 2008; Kalinkin dkk, 2012 dan Pontikes dkk, 2012). Hal ini karena



penggunaan semen khususnya pada bidang konstruksi dinilai lebih fleksibel jika dibandingkan dengan bahan konstruksi lainnya. Sebagai bahan pembuatan semen *slag* juga dapat diaplikasikan dalam skala industri yang lebih besar sehingga *slag* dapat direduksi dalam jumlah yang lebih banyak. Semen dengan bahan dasar *slag* atau yang lebih dikenal dengan semen geopolimer dapat menjadi salah satu solusi dalam pengelolaan limbah bagi industri pertambangan karena *slag* dapat direduksi dalam jumlah yang lebih besar dengan waktu yang lebih cepat. Semen geopolimer juga dapat dijadikan sebagai salah satu terobosan yang dapat mengurangi dampak negatif dari industri semen biasa (semen Portland) terhadap lingkungan mengingat banyaknya limbah berbahaya seperti emisi karbon dioksida yang dihasilkan untuk setiap ton produk semen, sementara dari segi ekonomi pemanfaatan *slag* sebagai bahan dasar maupun bahan campuran semen geopolimer juga dapat memberikan nilai tambah bagi industri pertambangan dan pemurnian mineral karena dapat meminimalisasi pengeluaran, waktu dan tempat dalam mengolah limbah *slag* dan menjadikan *slag* menjadi material dengan nilai guna dan nilai ekonomi yang lebih tinggi dengan beberapa keunggulan sifat baik secara mekanik, fisik maupun kimia jika dibandingkan dengan semen biasa sehingga dapat diaplikasikan dalam berbagai aspek utamanya untuk menunjang perkembangan infrastruktur.

Proses sintesis geopolimer berperan penting dalam menghasilkan geopolimer dengan keunggulan sifat baik secara fisik, mekanik maupun kimia. Oleh karena itu untuk menghasilkan geopolimer yang sesuai dengan sifat yang diharapkan dibutuhkan beberapa parameter yang harus digunakan dalam proses sintesis. Parameter-parameter yang berpengaruh dalam proses sintesis *slag* agar dapat menghasilkan geopolimer yang berkualitas baik diperoleh dari beberapa penelitian, diantaranya seperti penelitian yang dilakukan oleh Maragkos pada tahun 2008 yang menemukan bahwa sifat mekanik (kekuatan tekan) dan sifat fisik (densitas) semen geopolimer dapat dipengaruhi oleh konsentrasi larutan alkali sebagai aktivator, hal serupa juga dilakukan oleh Komnitsas (2008) dan Kalinkin (2012) yang menemukan bahwa temperatur dan waktu *curing* selama proses sintesis juga mempengaruhi sifat mekanik maupun sifat fisik geopolimer. Penelitian lain yang dilakukan oleh Ali Nazari pada tahun 2010 menunjukkan bahwa sifat mekanik dalam seperti kekuatan tekan dari geopolimer dipengaruhi

oleh faktor utama yaitu konsentrasi alkali (NaOH), rasio berat NaOH dan ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ), rasio berat alkali aktivator, temperatur *curing* dan waktu *curing*. Berdasarkan hasil yang telah dilakukan pada penelitian sebelumnya, maka pada penelitian ini akan mengkaji dan menganalisa pengaruh dari temperatur dan waktu *curing* terhadap sifat mekanik dan sifat fisik semen geopolimer dengan *slag ferronickel* sebagai prekursor dan NaOH sebagai aktivator. Parameter temperatur dan waktu *curing* pada penelitian ini menggunakan *range* yang berbeda dengan penelitian sebelumnya agar dapat diperoleh temperatur optimum yang lebih rendah dan waktu *curing* yang lebih cepat dalam proses sintesis geopolimer sehingga dapat dijadikan referensi bagi industri semen geopolimer. Hal ini dilakukan mengingat temperatur dan waktu *curing* yang digunakan untuk sekali produksi erat kaitannya dengan biaya produksi yang harus dikeluarkan oleh industri dan dengan temperatur optimum yang lebih rendah dan waktu yang lebih singkat dapat menghemat biaya operasional yang dibutuhkan. Selain itu dengan waktu *curing* yang lebih singkat, maka limbah *slag* dapat direduksi lebih cepat dan penanggulangan masalah lingkungan akibat limbah ini juga dapat teratasi dengan lebih cepat.

## 1.2 Rumusan Masalah

Permasalahan yang akan dikaji pada penelitian ini adalah bagaimana pengaruh temperatur dan waktu *curing* terhadap sifat mekanik dan sifat fisik semen geopolimer berbasis *slag ferronickel* ?

## 1.3 Batasan Masalah

Pada penelitian ini, agar lebih terarah ditetapkan batasan masalah yaitu :

1. *Slag* sebagai prekursor semen geopolimer adalah *slag ferronickel* yang berasal dari hasil peleburan dan pemurnian laterit nikel PT. ANTAM Tanjung Puli Prov. Halmahera Timur.
2. Pembuatan semen geopolimer berbasis *slag ferronickel* dilakukan pada lingkungan terbuka dengan RH, tekanan udara dan temperatur standar.
3. Media aktivasi yang digunakan adalah udara.

#### **1.4 Tujuan**

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisa pengaruh peningkatan temperatur dan waktu *curing* terhadap sifat mekanik dan sifat fisik semen geopolimer berbasis *slag ferronickel*.

#### **1.5 Manfaat**

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat bagi perkembangan penelitian mengenai pemanfaatan limbah industri pertambangan berupa *slag* sehingga menjadikan *slag* khususnya *slag ferronickel* sebagai material yang bermanfaat dan bernilai ekonomi tinggi serta potensial untuk dikembangkan dalam dunia industri. Selain itu pada penelitian ini diharapkan dapat ditemukan temperatur optimum yang lebih rendah dan waktu *curing* dalam proses geopolimerisasi yang lebih singkat sehingga dapat menjadi referensi bagi industri agar dapat meminimalisasi biaya produksi dalam pengembangan pengelolaan *slag ferronickel* menjadi semen geopolimer. Harapan lain tentunya dengan adanya pemanfaatan *slag ferronickel* sebagai bahan semen geopolimer dapat menjadi salah satu alternatif dalam upaya pelestarian lingkungan.

## **BAB 2**

### **KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI**

Selain menampilkan kajian pustaka mengenai beberapa faktor yang mempengaruhi sifat geopolimer pada bab ini juga akan ditampilkan teori dasar tentang semen geopolimer beserta aplikasi dan perbandingannya dengan semen Portland/semen biasa serta proses pembuatan dan material yang digunakan untuk sintesis geopolimer.

#### **2.1 Kajian Pustaka**

Semen geopolimer pertama kali dikembangkan pada tahun 1980 yang merupakan jenis poli(sialate)-(K, Na, Ca) atau semen berbasis slag geopolimer. Dalam proses produksinya semen geopolimer membutuhkan bahan silikat alumina, reagen basa (larutan natrium atau kalium silikat) dan air. Seiring dengan perkembangannya semen geopolimer dapat dihasilkan melalui sintesis geopolimer dengan menggunakan bahan dasar anorganik lainnya seperti fly ash (Görhan, 2014; Yang, 2014; Martin, 2015; Zhang, 2015), metakaolin (Bing-hui, 2014; Aredes, 2015; Ozer, 2015), maupun berbagai jenis slag seperti slag Cu-Ni (Kalinkin, 2012), slag ferrochrom (Karakoç, 2014) dan slag ferronickel (Maragkos, 2008; Komnitsas, 2012; Abdel-Gawwad, 2014; Lemonis, 2015).

Seperti halnya semen konvensional lainnya, semen geopolimer juga memiliki sifat dan karakter yang berbeda-beda. Sifat-sifat semen geopolimer sangat dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti bahan baku yang dipilih sebagai material utama sumber aluminosilikat, jenis aktivator dan parameter-parameter yang digunakan dalam proses sintesis geopolimer seperti variasi konsentrasi, S/L rasio, temperatur dan waktu *curing* dan sebagainya (Nazari, A, 2012). Beragamnya bahan baku, perlakuan dan variasi parameter yang digunakan dalam proses sintesis menjadi faktor dalam pengklasifikasian semen geopolimer.

Beberapa penelitian yang telah dilakukan sebelumnya diketahui bahwa sifat mekanik seperti kuat tekan dan kuat tarik fleksural geopolimer meningkat dan mencapai nilai optimum seiring dengan meningkatnya konsentrasi aktivator alkali,

selain itu sifat mekanik tersebut juga dipengaruhi oleh temperatur *curing* yang digunakan dalam proses sintesis geopolimer, seperti penelitian yang dilakukan oleh Atiş pada tahun 2015 dimana kuat tekan geopolimer mencapai 120 MPa. Dengan adanya temperatur dan waktu *curing* juga mempengaruhi sifat mekanik seperti kekuatan lentur dan kuat tekan serta sifat fisik seperti densitas dan permeabilitas. Penelitian yang dilakukan oleh Pavel Rovnanik pada tahun 2010 yang menemukan bahwa kuat tekan geopolimer yang menggunakan metakaolin sebagai prekursor meningkat pada temperatur *curing* 40, 60 dan 80 °C dan waktu *curing* 1-4 jam. Peningkatan temperatur *curing* juga dapat menyebabkan densitas geopolimer meningkat, hal ini dipengaruhi oleh distribusi pori yang merata yang terbentuk setelah pemanasan pada temperatur 55, 65 dan 80 °C selama 1 jam (Aredes, 2015). Sementara jika aktivasi dilakukan pada ruangan berpendingin dengan temperatur yang lebih rendah ( $\pm 20$  °C) *shrinkage* geopolimer yang dihasilkan lebih rendah dibandingkan dengan geopolimer yang disintesis pada temperatur ruangan (Yang, 2014). Akan tetapi jika dilakukan pada temperatur tinggi antara 300-1000°C, maka geopolimer akan mengalami perubahan warna dan berat sampel mengalami penurunan (Ranjbar, 2014). Pada tahun 2010, Oh, E.J dalam penelitiannya yang memadukan *slag* dan *fly ash* sebagai prekursor menemukan bahwa peningkatan waktu *curing* pada temperatur 80 °C dapat meningkatkan kekuatan tekan geopolimer.

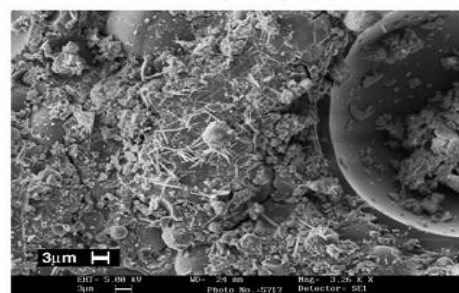
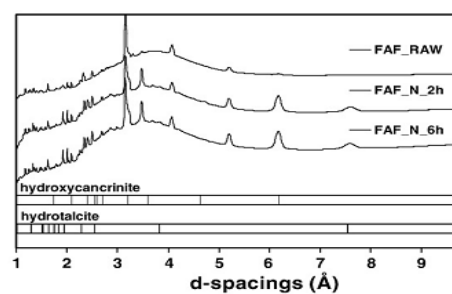
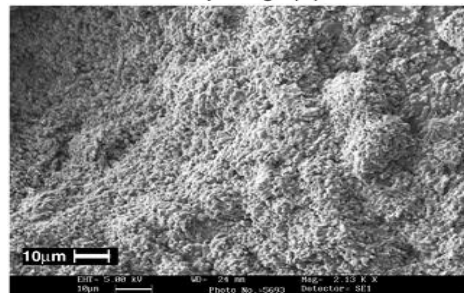
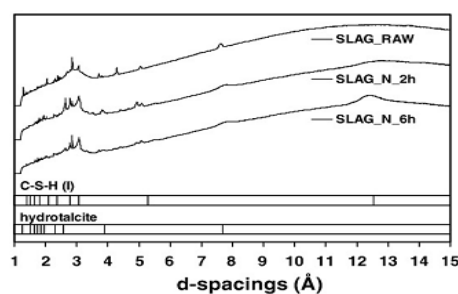
Selain perubahan sifat fisik dan mekanik, parameter sintesis seperti temperatur dan waktu *curing* juga mampu memberikan perubahan terhadap mikrostruktur geopolimer. Pada tahun 2000, Swaddle, TW dan tim berhasil membuktikan keberadaan molekul alumino-silikat terisolasi dalam larutan pada konsentrasi dan pH yang relatif tinggi yang dilakukan pada temperatur yang sangat rendah, mencapai - 9 °C. Pada temperatur kamar atau temperatur yang lebih tinggi, reaksi terjadi sangat cepat sehingga tidak dapat dideteksi dengan peralatan analisis konvensional. Mikrostruktur yang dibentuk oleh geopolimer juga dipengaruhi oleh temperatur. Pengamatan dengan sinar-X menunjukkan bahwa pada temperatur kamar geopolimer memiliki struktur yang amorf, akan tetapi dengan peningkatan temperatur struktur geopolimer akan terus mengalami perubahan hingga dapat membentuk matriks kristal umumnya di atas 250 °C dan geopolimer menjadi lebih

kristal pada temperatur di atas 500 -1000 °C tergantung pada sifat dari kation alkali (Zoulgami, M, 2002). Untuk aplikasi komersial dan geopolimer industri umumnya bekerja pada temperatur di atas 200 °C hingga 1400 °C, yaitu temperatur di atas dehidroksilasi. Air hadir hanya pada suhu di bawah 150 °C – 200 °C, umumnya dalam bentuk gugus –OH. Oleh karena itu, ilmuwan yang bekerja untuk aplikasi geopolimer pada temperatur rendah, seperti semen dan pengelolaan limbah, mencoba dengan menggunakan berbagai variasi larutan alkali untuk menentukan kation hidrasi dan molekul air sehingga diperoleh geopolimer dengan sifat dan mikrostruktur yang sesuai dengan aplikasi tersebut (Barbosa, 2000). Perbedaan jenis bahan baku yang digunakan dengan temperatur dan waktu *curing* yang berbeda memberikan serubahan mikrostruktur yang beragam bagi geopolimer.

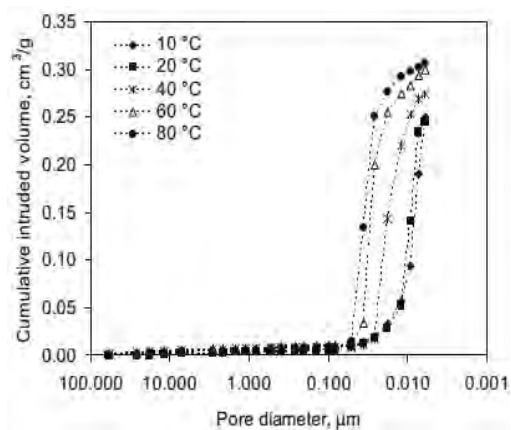
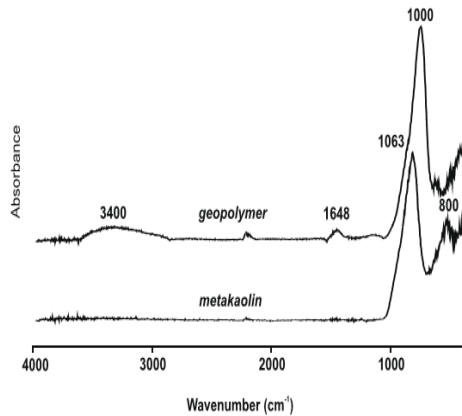
Beberapa hasil penelitian yang telah dilakukan untuk melihat pengaruh temperatur dan waktu *curing* terhadap sifat geopolimer dapat dilihat pada Tabel. 2.1.

Tabel 2.1 Beberapa Penelitian tentang Hubungan Temperatur dan Waktu *Curing* terhadap Sifat Geopolimer

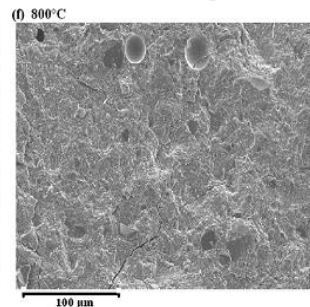
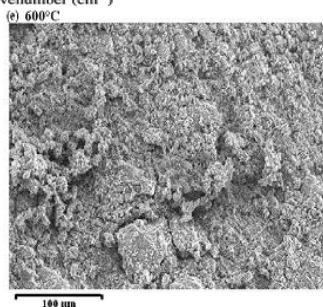
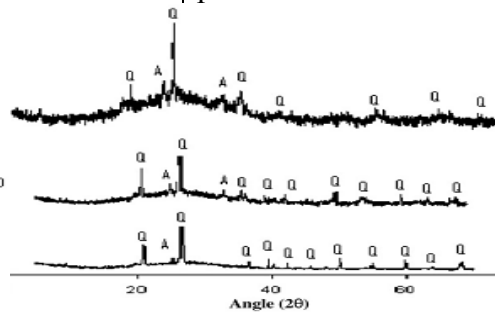
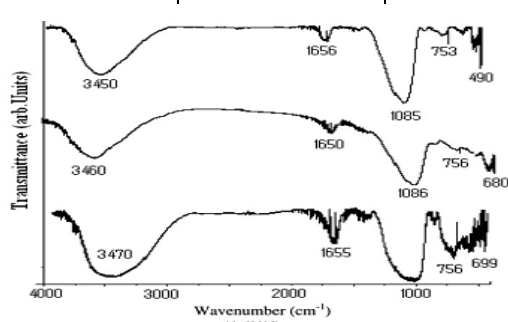
Peneliti/ Tahun	Prekursor/ Alkali	Variabel <i>Curing</i>	Sifat yang Dihasilkan
Oh, E.J, dkk (2009)	BF <i>slag</i> + <i>fly ash</i> / NaOH (10M)	T : 80 °C, RH: 100% t : 1-14 hari	Semakin lama waktu <i>curing</i> , kuat tekan semakin meningkat



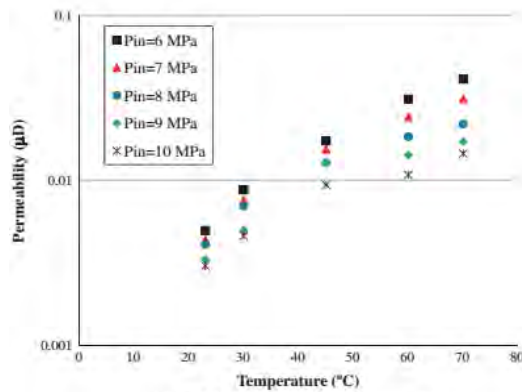
Rovnaník, P (2010)	Metakaolin / Natrium Silikat	T : 10,20,40,60 dan 80 °C t : 1 dan 4 jam <i>Post curing</i> : 28 hari	Kuat tekan meningkat seiring dengan meningkatnya waktu dan temperatur <i>curing</i> (T= 60-80 °C > T = 0-40 °C)
-----------------------	------------------------------------	---	---



Elembi, dkk (2011)	Lempung kaolit/ NaOH (10 M)	T : 450, 500, 550, 600, 650, 700, 750 dan 800 °C, dengan kenaikan 5° setiap menit t : 10 jam	<i>Setting time</i> lebih lama pada 500-700 °C dan meningkat < 700 °C, <i>Shrinkage</i> paling besar pada T < 700 °C, kuat tekan meningkat pada T 500-700 °C dan turun pada T < 700 °C.
-----------------------	-----------------------------------	---	--



Nasvi, dkk (2013)	<i>Fly ash</i> / NaOH (8 M)	T : 30,45,60 dan 70 °C t : 24 jam <i>Post curing</i> : 28 hari	Permeabilitas geopolimer meningkat seiring dengan meningkatnya temperatur
----------------------	--------------------------------	---	--

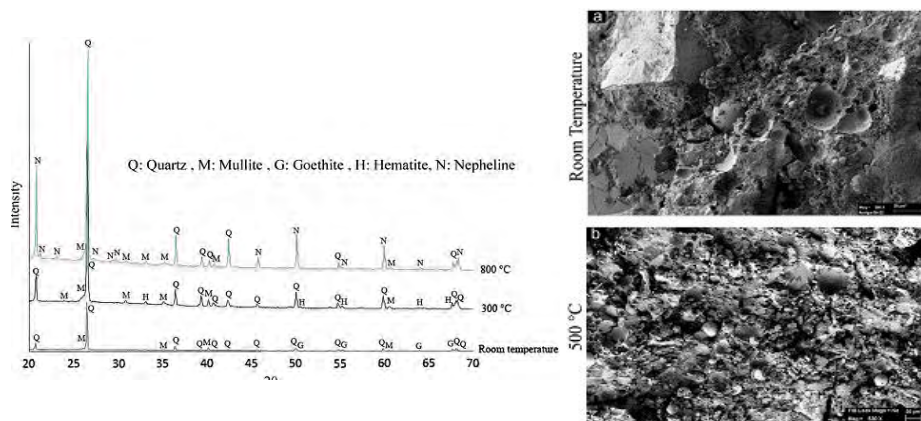


(a) 12 MPa confining pressure

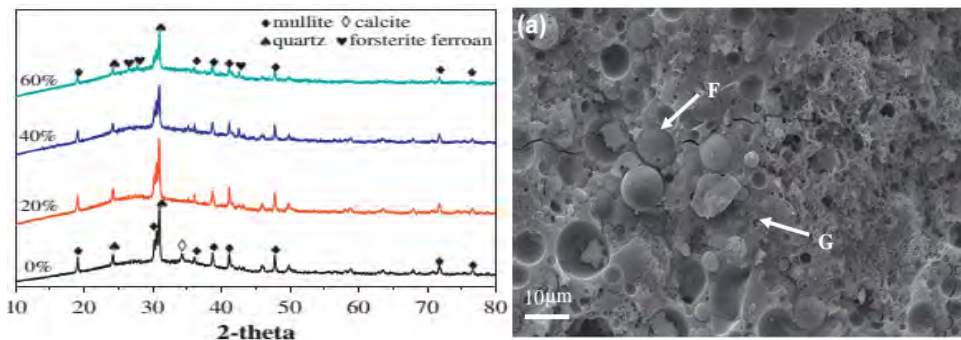


Lemougna, dkk (2011)	Abu vulkanik/ NaOH (bahan tambahan: pasir)	T : 250 – 1000 °C t : 2 jam	Kuat tekan maksimum pada 250 °C, rasio Na <sub>2</sub> O/SiO <sub>2</sub> : 0,3. Dengan tambahan pasir pada mortar maksimum 10%.
Ranjbar, dkk (2014)	Fly ash-palm oil fuel ash / NaOH (16 M)	T : 300,500,800 dan 1000 °C t : 2 jam dengan 4 variasi <i>holding time</i>	Tahap awal kenaikan temperatur, kuat tekan cenderung meningkat, untuk temperatur yang lebih tinggi kuat tekan mulai turun, densitas menurun pada T tinggi

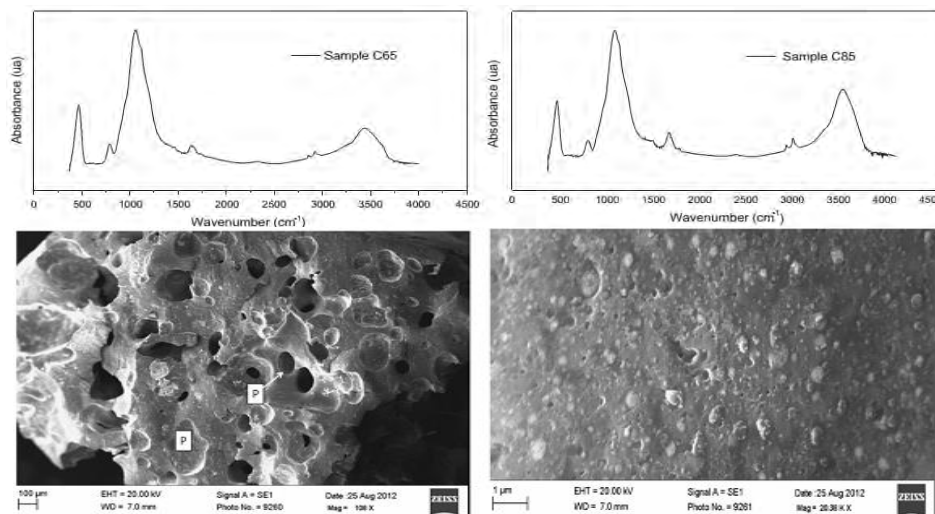




Yang, T dkk (2014)	Fly ash + HMNS/ sodium silikat	T : $\leq 20$ °C t : 24 hari Post curing : 28 hari Dengan variasi S/L rasio	Pada temp. rendah kuat tekan meningkat lambat akan tetapi <i>shrinkage</i> lebih rendah dibanding pada temp. normal.
-----------------------	---	---	--



Aredes, dkk (2015)	Metakaolin /potassium metasilikat	T : 55, 65 dan 80 °C t : 1 jam Post curing : 28 hari	Densitas dan kuat tekan maksimum pada 65°C, karena distribusi pori lebih merata.
-----------------------	---	--	---



## 2.2 Dasar Teori

### 2.2.1 Semen

Dalam pengertian umum, semen adalah suatu binder yaitu suatu zat yang dapat menetapkan dan mengeraskan dengan bebas, dan dapat mengikat material lain. Semen (cement) merupakan hasil industri dari paduan bahan baku seperti batu kapur/gamping sebagai bahan utama dan lempung/tanah liat atau bahan pengganti lainnya dengan hasil akhir berupa padatan berbentuk bubuk/bulk, tanpa memandang proses pembuatannya, yang mengeras atau membatu pada pencampuran dengan air. Semen yang digunakan dalam konstruksi digolongkan kedalam semen hidrolik dan semen non-hidrolik. Semen hidrolik adalah material yang menetap dan mengeras setelah dikombinasikan dengan air, sebagai hasil dari reaksi kimia dari pencampuran dengan air, dan setelah pembekuan, mempertahankan kekuatan dan stabilitas bahkan dalam air. Semen non-hidrolik meliputi material seperti batu kapur dan gipsum yang harus tetap kering supaya bertambah kuat dan mempunyai komponen cair. Kebanyakan konstruksi semen saat ini adalah semen hidrolik dan kebanyakan didasarkan pada semen Portland, yang dibuat dari batu kapur, mineral tanah liat tertentu, dan gipsum dengan komposisi utama dapat dilihat pada Tabel 2.2, melalui proses dengan temperatur yang tinggi yang menghasilkan karbon dioksida dan berkombinasi secara kimia yang menghasilkan bahan utama menjadi senyawa, kemudian dihaluskan untuk menghasilkan semen.

Tabel 2.2 Komponen Utama Semen Biasa/Semen Portland

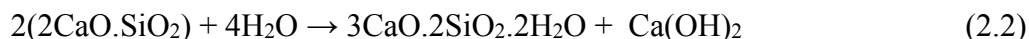
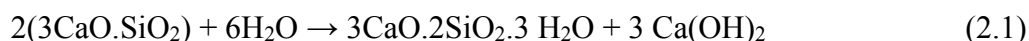
Nama Senyawa	Komposisi Oksida
Tricalcium silicate ( $C_3S$ )	$3CaO.SiO_2$
Dicalcium silicate ( $C_2S$ )	$2CaO.SiO_2$
Tricalcium aluminate ( $C_3A$ )	$3CaO.Al_2O_3$
Tetracalcium aluminoferrate ( $C_4AF$ )	$4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$

Sumber : Bayuseno, AP, 2010

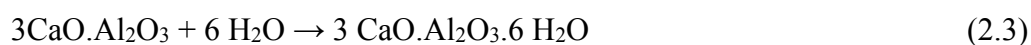
Dalam proses pembuatan semen hidrolik terjadi reaksi antara komponen-komponen semen dengan air yang disebut hiderasi semen. Hiderasi beberapa senyawa pada semen hidrolik : hiderasi kalsium silikat ( $Ca_2Si$  dan  $Ca_3Si$ ) yang akan

terhidrolisa menjadi kalsium hidroksida dan kalsium silikat hidrat, hiderasi kalsium alumina ( $\text{Ca}_3\text{Al}$ ) yang akan menghasilkan kalsium alumina hidrat ( $3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.3\text{H}_2\text{O}$ ), dan hiderasi  $\text{Ca}_4\text{AlFe}$  menurut reaksi masing-masing sebagai berikut :

- Hiderasi ( $\text{Ca}_2\text{Si}$  dan  $\text{Ca}_3\text{Si}$ )



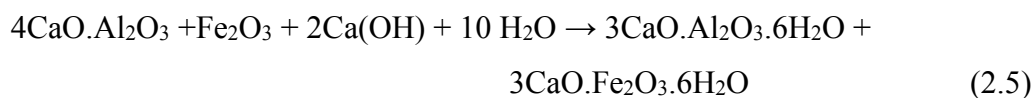
- Hiderasi ( $\text{Ca}_3\text{Al}$ ) yang terdiri atas reaksi tanpa *gypsum* :



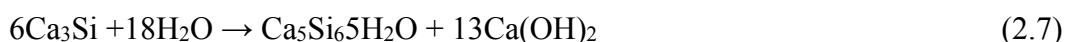
Hiderasi ( $\text{Ca}_3\text{Al}$ ) dengan *gypsum* :



- Hiderasi  $\text{C}_4\text{AlFe}$  :



Apabila semen dicampur dengan air maka akan terjadi pengikatan (*setting*) yang terus berjalan seiring dengan waktu hingga diperoleh kekuatan proses atau pengerasan yang dinamakan *hardening* dengan reaksi sebagai berikut :



Pada saat *setting* dan pengerasan, oksida bereaksi dengan air untuk membentuk sedikit kalsium silikat hidrate ( $\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3$ ) dan kapur [ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ]. Oksida  $\text{C}_3\text{S}$  dan  $\text{C}_3\text{A}$  bertanggung jawab terhadap kekuatan awal.

Sifat-sifat semen Portland juga dipengaruhi oleh komposisi kimianya, dengan komposisi kimia yang berbeda maka akan menghasilkan sifat semen Portland yang berbeda pula, dengan demikian maka semen Portland juga dapat diaplikasikan pada bidang konstruksi yang sesuai dengan sifat-sifat yang dimiliki. Bangunan dengan kondisi lingkungan yang asam membutuhkan semen yang tahan

terhadap asam dan sebaliknya. Demikian pula halnya pada lingkungan yang panas atau dingin, bangunan besar, bertingkat dengan bangunan yang kecil seharusnya menggunakan jenis semen yang berbeda dengan syarat semen yang digunakan memiliki ketahanan terhadap kondisi lingkungan sehingga bangunan dapat bertahan lebih lama. Dengan komposisi, sifat dan penggunaan yang berbeda maka semen Portland juga dibedakan menjadi beberapa tipe. Tipe-tipe semen Portland berdasarkan komposisi kimianya dapat dilihat pada Tabel 2.3.

Tabel 2.3 Klasifikasi Semen Portland Berdasarkan Komposisi Kimia

Tipe	Nama	Komposisi Kimia	Sifat dan Penggunaan
I	OPC	MgO (5%) SiO <sub>3</sub> (2,5 – 3%)	- Tahan sulfat, hidrasi panas tinggi - Bidang konstruksi dan ketahanan
II	MHPC	SiO <sub>2</sub> (20%) Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (6%) Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (6%) MgO (6%)	- Tahan sulfat, hidrasi panas sedang - Konstruksi daerah pelabuhan dan sekitar pantai
III	HEPC	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (3,5–4,5 %) MgO (6%) C <sub>3</sub> Si (35%) C <sub>3</sub> Al (15%)	- Kekuatan awal tinggi - Pondasi, beton tahan udara dingin, Konstruksi daerah pelabuhan dan sekitar pantai
IV	LHPC	MgO (6,5%) Dengan kandungan C <sub>3</sub> Si dan C <sub>3</sub> Al yang lebih rendah	- Tahan retak, hidrasi panas rendah - Konstruksi beton yang besar dan tebal
V	SRPC	MgO (6%) SiO <sub>3</sub> (2,3%) C <sub>3</sub> Al (5%)	- Tahan sulfat - Konstruksi pelabuhan, terowongan, pengeboran lepas pantai/laut.

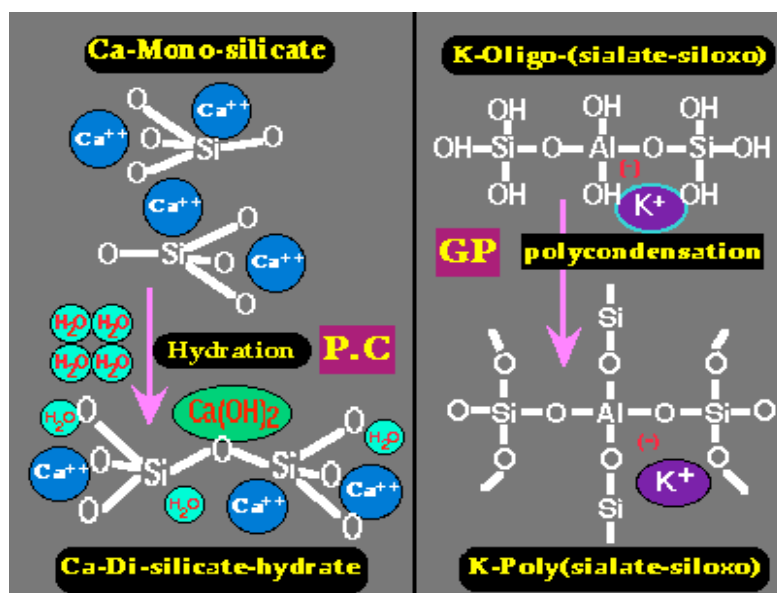
Sumber : Firdaus, 2007

### 2.2.2 Semen Geopolimer

Menurut istilah, semen geopolimer adalah sistem pengikat yang mengeras pada suhu kamar, seperti semen Portland biasa (Davidovits, 1991). Semen geopolimer merupakan zat pengikat yang menggunakan bahan anorganik seperti SiO<sub>2</sub> dan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> sebagai material utama dan tidak bergantung pada kalsium karbonat sehingga menghasilkan sedikit CO<sub>2</sub> selama proses pembuatannya. Semen ini

merupakan bahan yang inovatif dan alternatif bagi semen Portland konvensional yang digunakan dalam infrastruktur transportasi, konstruksi dan aplikasi penahan gelombang di lepas pantai. Hal ini berkaitan dengan minimnya bahan alami yang digunakan dalam proses produksinya sehingga dapat mengurangi jejak karbon secara signifikan, serta daya tahan yang lebih baik terhadap beberapa perubahan alam dibandingkan dengan semen konvensional. Semen geopolimer juga dapat mengeras (*cure*) lebih cepat dibandingkan dengan semen Portland. Meski demikian, pada semen geopolimer waktu pengerasan dapat diatur cukup lambat sehingga dapat dicampur di pabrik batch yang dapat digunakan dalam pencampuran beton.

Selain memiliki sifat dan jenis yang berbeda dengan semen Portland, semen geopolimer juga memiliki kemampuan untuk membentuk ikatan kimia yang kuat dengan semua jenis batu agregat. Proses reaksi selama pengerasan semen geopolimer melalui kondensasi kalium/natrium poli-oligo(sialate-siloxo) menjadi kalium/natrium poli(sialate-siloxo) sedangkan pada semen Portland (PC) melalui hidrasi sederhana kalsium/natrium silikat menjadi hidrat kalsium di-silikat (CSH) dan kapur  $\text{Ca(OH)}_2$  dengan reaksi seperti pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Perbedaan Proses Reaksi selama *Curing* antara Semen Portland dan Semen Gepolimer (Davidovits, 2013)

Dilain pihak geopolimer terbentuk dari fusi material silika dan alumina. Perbandingan komposisi kimia untuk jenis semen Portland dan semen geopolimer dapat dilihat pada Tabel 2.4.

Tabel 2.4 Rentang Komposisi yang Lazim dari Semen Geopolimer dan Portland

Oksida	Kadar Semen Portland (%)	Kadar Semen Geopolimer (%)
CaO	60 – 67	11
SiO <sub>2</sub>	17 – 25	59
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3 – 8	18
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.5 – 6.0	-
MgO	0.5 – 4.0	3
K <sub>2</sub> O, Na <sub>2</sub> O	0.3 – 1.2	9
SO <sub>3</sub>	2.0 – 3.5	-

Sumber : Bayuseno, AP, 2010

Semen geopolimer dapat diklasifikasikan berdasarkan bahan baku/prekursor yang digunakan dalam proses sintesisnya. Secara umum semen geopolimer terdiri dari empat (4) kategori :

1. Semen geopolimer berbasis *slag* (Davidovits, sejak 1994; Komnitsas, 2008; Wang, 2010; Sakoi, 2011; Pontikes, 2012; Yang, 2014)  
Komponen manufaktur : metakaolin MK-750 + *slag* dari *furnace* + alkali silikat (*user-friendly*). Jenis geopolimer yang dibentuk : Si/Al = 1, Ca-poli (di-sialate) (tipe anorthite) + Si/Al = 3, K-poli (sialate-disiloxo) (tipe orthoclase) dan CSH Ca-disilikat hidrat.
2. Semen geopolimer berbasis batuan (Gimeno, 2003)  
Komponen manufaktur : metakaolin MK-750, *blast furnace slag*, tufa vulkanik (dikalsinasi atau tidak dikalsinasi), tailing tambang dan alkali silikat (*user-friendly*). Jenis geopolimer yang dibentuk: Si/Al = 1, Ca-poli (di-sialate) (tipe anorthite) + Si/Al = 3-5 (Na, K)-poli(silate -multisiloxo) dan CSH Ca-disilikat hidrat.
3. Semen geopolimer berbasis *fly ash* (Palomo, 1999 dan 2004; Bayuseno, A.P, 2010; Ranjbar, 2014). Terdiri atas beberapa tipe yaitu :

- Tipe 1: semen geopolimer *fly ash* dengan aktivasi alkali.

Secara umum membutuhkan *heat hardening* pada 60 °C hingga 80 °C dan tidak diproduksi secara terpisah. Komponen manufaktur : *fly ash* + NaOH (*user-hostile*) : partikel *fly ash* tertanam dalam gel alumino-silikat dengan Si/Al = 1 atau Si/Al = 2, jenis zeolitic (chabazite-Na dan sodalite).

- Tipe 2 : semen geopolimer berbasis *slag* dan *fly ash* (Izquierdo, 2009; Oh, E.J, 2010).

Pengerasan pada suhu kamar. Komponen manufaktur : larutan silikat (*user friendly*) + *blast furnace slag* + *fly ash* : partikel *fly ash* tertanam dalam matriks geopolimer dengan Si/Al = 2, (Ca, K) -poli (sialat-siloxo).

#### 4. Semen geopolimer berbasis Fero-sialat

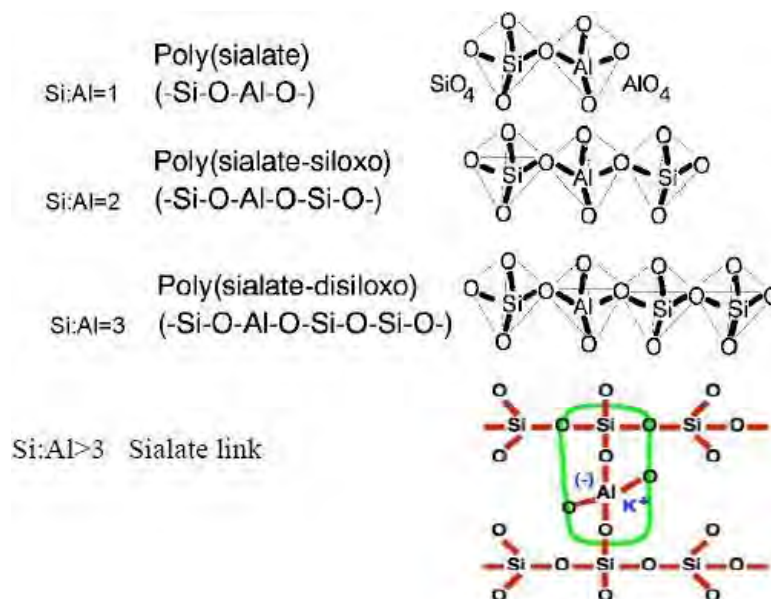
Sifatnya mirip dengan semen geopolimer berbasis batuan namun melibatkan unsur geologi dengan kandungan oksida besi yang tinggi. Jenis geopolimer yang dibentuk adalah dari jenis poli(fero-sialat) (Ca, K) -Fe-O)- (Si-O-Al-O-).

Semen geopolimer memiliki beberapa keunggulan dibandingkan dengan semen Portland. Berdasarkan hasil penelitian, Davidovits melaporkan bahwa semen geopolimer dapat mengeras dengan cepat. Pengujian pada mortar geopolimer ditemukan bahwa sebagian besar kekuatan diperoleh pada dua hari pertama selama proses curing. Keunggulan lain semen geopolimer dibanding semen Portland antara lain tahan terhadap panas dan api, dimana pada temperatur 300 °C semen Portland mengalami penurunan kekuatan sedangkan pada semen geopolimer tetap stabil hingga temperatur 600 °C. Selain itu semen geopolimer juga memiliki tingkat penyusutan yang lebih rendah serta memiliki ketahanan terhadap asam yang lebih baik jika dibanding semen Portland. ketika direndam dalam larutan asam sulfat dan asam klorida semen geopolimer kehilangan berat dengan presentase sekitar 5-8%, sedangkan semen Portland kehilangan berat mencapai 30-60%. Kendati demikian kuat tekan semen atau beton geopolimer tetap mengalami penurunan apabila mengalami kontak dengan larutan asam jika dibandingkan dengan semen geopolimer yang tidak terkontaminasi oleh larutan asam (Bakharev, T, 2005; Gourley, 2005; Song, 2005).

### 2.2.3 Geopolimer

Istilah geopolimer diperkenalkan oleh Davidovits sejak tahun 1976 yang mengacu pada rantai tiga dimensi (3D) polysialat yang dihasilkan dari hidroksilasi dan polikondensasi pada temperatur dibawah 160 °C dari mineral alam, seperti kaolin, dan *fly ash*. Geopolimer adalah jaringan aluminosilikat amorf dibentuk oleh polikondensasi individu  $[\text{SiO}_4]^{4-}$  dan  $[\text{AlO}_4]^{5-}$  tetrahedral, yang merupakan reaksi antara silika amorf dan padatan yang kaya alumina dengan larutan alkali tinggi untuk membentuk amorf menjadi polimer anorganik aluminosilikat semi-kristal (Nazari, 2012). Geopolimer menggunakan bahan mineral aluminosilikat ( $\text{SiO}_2$  dan  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) untuk menggantikan rantai C. Karena jaringan polimer yang dibentuk berupa polimer silikon-okso-aluminat (sialat) sehingga geopolimer disebut juga poli(sialat). Material ini dapat digunakan untuk *coating*, perekat (adhesive), sebagai pengikat pada serat komposit (*fibre composites*) dan sebagai enkapsulasi limbah (*waste encapsulation*).

Pada geopolimer, polimer membentuk jaringan silikon-oksigen-aluminium (Si-O-Al) dengan mengubah tetrahedral silikon dan aluminium sehingga bergabung tiga arah dengan pemakaian secara bersama atom O seperti yang ditampilkan pada Gambar 2.2.



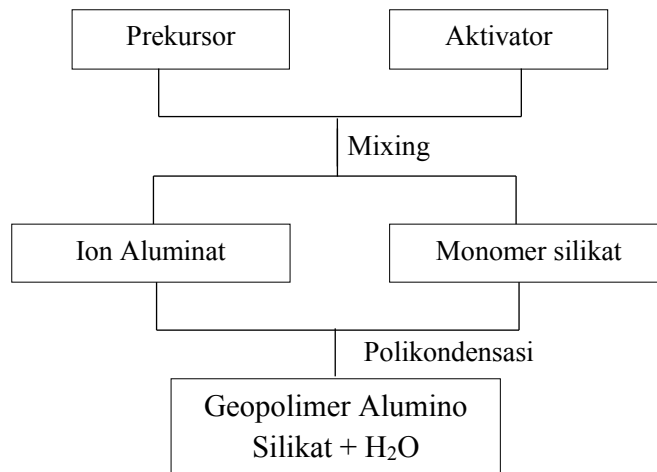
Gambar 2.2 Struktur Tiga Dimensi Polysialate dan Ikatan yang Terjadi dalam Geopolimer (Davidovits, 2008)



Seiring dengan berjalannya waktu, geopolimer disintesis dengan menggunakan berbagai material anorganik lain dengan menggunakan aktivator yang bervariasi seperti metakaolin (Aredes, dkk, 2015), abu vulkanik dan *slag* dari proses pemurnian mineral seperti *slag* feronikel (Maragkos, 2008 dan Komnitsas, 2012), serta *slag* Cu-Ni (Kalinkin, 2012). Berdasarkan bahan yang digunakan geopolimer secara umum dapat diklasifikasikan ke dalam dua kelompok besar: geopolimer anorganik murni dan geopolimer yang mengandung organik yang dalam proses sintesisnya menggunakan makromolekul alami. Pada dasarnya geopolimer adalah mineral dengan senyawa atau campuran senyawa yang terdiri dari unit berulang, misalnya silico-oksida (-Si-O-Si-O-), silico-aluminat (-Si-O-Al-O-), ferro-silico-aluminat (-Fe-O-Si-O-Al-O-) atau alumino-fosfat (-Al-O-PO-), dibuat melalui proses geopolimerisasi. Selain itu proses pembuatan semen geopolimer juga menggunakan alkali seperti NaOH dan KOH sebagai pelarut yang juga terus dikembangkan dengan berbagai variasi konsentrasi sehingga diperoleh semen geopolimer dengan sifat yang ditargetkan untuk aplikasi tertentu seperti semen tahan api dan tahan terhadap sulfat atau larutan asam lainnya (Komnitsas, 2012).

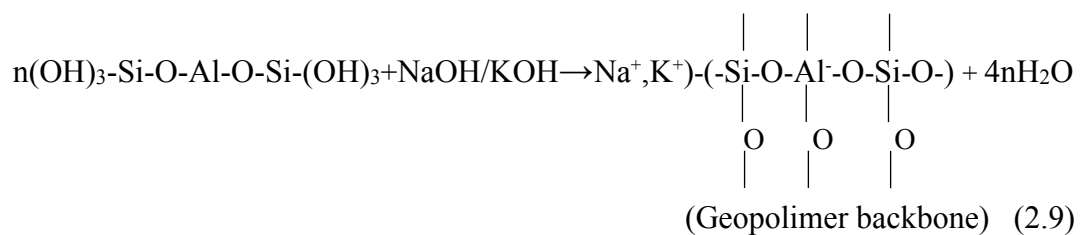
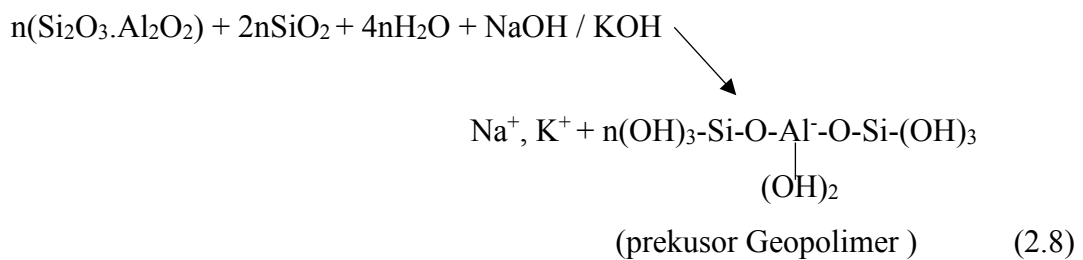
#### **2.2.4 Sintesis Geopolimer**

Geopolimer dihasilkan melalui proses sintesis mineral anorganik yang dikenal dengan geosintesis atau proses geopolimerisasi. Geopolimerisasi adalah proses menggabungkan banyak molekul kecil yang dikenal sebagai oligomer ke jaringan kovalen. Sintesis geo-kimia dilakukan melalui oligomer (dimer, trimer, tetramer, pentamer) yang menyediakan struktur satuan aktual dari bangunan makromolekul tiga dimensi. Geopolimerisasi merupakan proses aktivasi bahan baku (prekursor) yang berupa silika-alumina dengan aktivator larutan alkali silikat. Prosesnya meliputi pelarutan prekursor dengan aktivator diikuti oleh pengerasan (curing) pada temperatur ambien menjadi padatan yang disebut geopolimer. Secara umum semen geopolimer disusun oleh tiga komponen utama. Unsur-unsur anorganik yang memiliki struktur kristal akan diubah bentuknya menjadi amorf sampai semi-kristal pada geopolimer. Gambar 2.3 merupakan ilustrasi komponen pembuatan geopolimer.



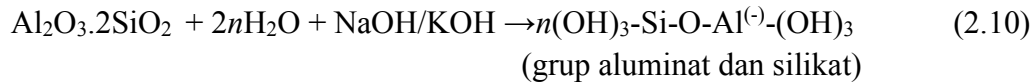
Gambar 2.3 Skematis Proses Pembentukan Geopolimer (Hermansyah, M, 2008)

Skema pembentukan material geopolimer (Van Jaarsveld dkk, 1997; Davidovits, 1999) yang diawali dengan pembentukn prekursor geopolimer kemudian dilanjutkan dengan pembentukan *geopolymer backbone*:



Reaksi kimia yang terjadi terdiri dari tiga tahapan (Davidovits, 1999; Xu, 2002) diawali dengan terputusnya atom Si dan Al dari material sumber karena kekuatan ion hydrogen, transportasi atau orientasi atau kondensasi yang dimulai dari ion yang membentuk monomer dan pembentukan ikatan atau polikondensasi/polimerisasi dari monomer membentuk struktur polimer, dengan rinciaan reaksi sebagai berikut :

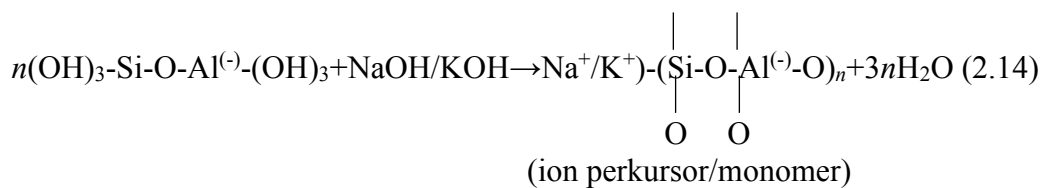
1. *Dissolution* atau pembubaran atom-atom Si dan Al dari bahan sumber melalui aksi ion hidroksida. Reaksi ini dikenal sebagai reaksi hidrolisis alkalin dimana material sumber aluminosilikat dipecah oleh larutan alkali pada pH tinggi yang berlangsung secara cepat dan menghasilkan grup aluminat (Al-OH) dan grup silikat (Si-OH), dengan reaksi :



Reaksi disolusi dari sumber  $\text{SiO}_2$  dan  $\text{Al}_2\text{O}_3$  secara terpisah menurut (Tennakon dkk, 2014) yaitu :



2. Reorientasi : transportasi, orientasi, atau kondensasi ion prekursor terlarut (seperti  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Si}^{4+}$ ) menjadi monomer. Pada tahap ini grup aluminat dan grup silikat membentuk ion prekursor menjadi monomer dalam larutan aluminosilikat super jenuh kemudian pada fase cair akan membentuk oligomer melalui proses gelasi/*gelation* (pembentukan gel), dengan reaksi :



Gel yang terbentuk sebagai oligomer dalam fase cair yang terjadi dalam larutan aluminosilikat jenuh melalui proses kondensasi. Pada tahapan ini air berperan dalam reaksi, dimana sejumlah air dilepaskan selama pembubaran tetapi berada dalam pori-pori gel. Reaksi kondensasi kemudian menjadi :



3. Pengaturan (polimerisasi), merupakan proses polikondensasi yang mengarah pada pembentukan polimer aluminosilikat amorf atau semi-kristal. Setelah proses *gelation*, sistem terus berlangsung untuk mengatur ulang dan mereorganisasi untuk meningkatkan konektivitas jaringan gel sehingga terbentuk jaringan aluminosilikat tiga dimensi yang dinamakan geopolimer.

Ketiga tahapan dan terjadi hampir bersamaan dan dapat saling tumpang tindih dengan yang lainnya, jadi sulit untuk mengisolasi atau menjelaskan tiap tahap secara terpisah (Palomo dkk, 1999). Geopolimer dapat membentuk satu dari tiga bentuk dasar (Davidovits, 1999) :

- 1) Poli (sialat), yang memiliki unit berulang  $[-\text{Si-O-Al-O-}]$ .
- 2) Poli (sialat-siloxo), yang memiliki unit berulang  $[-\text{Si-O-Al-O-Si-O}]$ .
- 3) Poli (sialat-disiloxo), yang memiliki unit berulang  $[-\text{Si-O-Al-O-Si-O-Si-O}]$ .

Proses sintesis geopolimer dapat dibedakan menjadi dua rute berdasarkan medium atau aktivator yang digunakan yaitu rute sintesis dengan medium alkali menengah ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Li}^+$ ,  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Cs}^+$  dan sejenisnya) dan rute sintesis dengan medium asam (asam fosfat dan asam humat). Reaksi geopolimerisasi (seperti untuk *fly ash*) termasuk salah satu dari reaksi polikondensasi anorganik (seperti untuk zeolit). Atas dasar ini reaksi polimerisasi *fly ash* dapat dibandingkan dengan reaksi-reaksi pembentukan zeolit. Dalam sintesis zeolit, umumnya reaksi dilakukan dalam kondisi basa menggunakan gugus  $-\text{OH}$  sebagai *mineralising agent*. Sintesis ini juga menunjukkan bahwa garam-garam alkali dan atau gugus hidroksida selalu diperlukan untuk terjadinya reaksi pelarutan silika dan alumina, serta diperlukan untuk katalisis terhadap reaksi kondensasinya.

Proses pengerasan geopolimer berbeda dengan pengerasan pada semen Portland yang merupakan proses hidrasi yang bersifat eksotermis. Proses pengerasan pada geopolimer merupakan reaksi polikondensasi yang bersifat endotermis, yang oleh karenanya laju pengerasan dapat ditingkatkan dengan meningkatkan suhu curing.

### 2.2.5 Sifat-Sifat Geopolimer

Geopolimer memiliki sifat-sifat yang membedakannya dengan material lain, baik sifat fisik maupun kimia. Sifat fisik merupakan sifat yang dimiliki material tanpa bereaksi dengan bahan lain, termasuk sifat mekanik. Sedangkan sifat kimia adalah perilaku material apabila bereaksi secara kimia dengan bahan lain. Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan diketahui bahwa geopolimer memiliki kekuatan awal yang tinggi, penyusutan (*shrinkage*) yang rendah, *freezethaw resistance*, tahan terhadap asam, tahan terhadap sulfat, tahan terhadap korosi dan reaksi agregat alkali yang tidak berbahaya.

Geopolimer yang diaplikasikan sebagai *concrete* memiliki kuat tekan yang lebih baik dan tahan terhadap pemanasan tinggi (Davidovits, 1994), selain itu *concrete* yang menggunakan geopolimer juga memiliki ketahanan terhadap asam. Hal ini menjadikan geopolimer berpotensi untuk bahan bangunan, immobilisator bahan-bahan beracun, peralatan keramik tahan panas, dan lain-lain (Komnitsas dan Zaharaki, 2008). Kekuatan geopolimer dipengaruhi oleh bahan aktivasi yang digunakan, sebagai contoh geopolimer yang diaktivasi dengan natrium hidroksida (NaOH) memiliki kekuatan yang lebih stabil jika dibandingkan dengan geopolimer yang diaktivasi dengan menggunakan natrium silikat ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ).

Dalam aplikasinya sebagai bahan konstruksi seperti semen atau binder menunjukkan bahwa geopolimer memiliki beberapa sifat yang lebih unggul dengan nilai kekuatan dan ketahanan yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan bahan konstruksi biasa. Selain itu dalam proses pembuatannya geopolimer membutuhkan waktu yang lebih cepat jika dibandingkan dengan waktu yang dibutuhkan untuk produksi semen konvensional lainnya. Dengan karakteristik sifat baik fisik, mekanik maupun sifat kimia tertentu menjadikan geopolimer sebagai material yang dapat diaplikasikan untuk bahan konstruksi seperti halnya semen dan binder maupun bahan konstruksi lainnya yang memiliki kekuatan dan ketahanan yang lebih baik. Perbandingan sifat geopolimer yang diaplikasikan sebagai bahan konstruksi antara lain dapat dilihat pada Tabel 2.5 dan Tabel 2.6.

Tabel 2.5 Sifat-Sifat Semen dan Binder Geopolimer

Sifat	Jenis Aplikasi	
	Semen	Binder
Mekanik	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kuat tekan (uniaxial): &gt;90 MPa pada 28 hari (untuk kekuatan awal tinggi mencapai 20 Mpa setelah 4 jam)</li> <li>- Kuat flexural: 10-15 Mpa pada 28 hari (untuk kekuatan awal tinggi mencapai 10 Mpa setelah 24 jam)</li> <li>- Modulus young: &gt;2 Gpa</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ekspansi linier : &lt; 5.10-6/K</li> </ul>
Fisik	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Penyusutan selama setting: &lt;0.05%, tidak dapat diukur</li> <li>- Freeze-thaw: massa yang hilang :&lt;0.1 % (ASTM 4842), kekuatan yang hilang &lt;5% setelah 180 siklus.</li> <li>- Wet-dry: massa yang hilang &lt;0.1% (ASTM 4843)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Konduktivitas panas 0.2 - 0.4 W/K.m</li> <li>- <i>Specific heat</i> : 0.7 - 1.0 kJ/kg</li> <li>- Densitas <i>bulk</i> 1 - 1.9 g/ml</li> <li>- Porositas terbuka 15 - 30%</li> <li>- Penyusutan geopolimerisasi 0.2 – 0.4%</li> <li>- D.T.A : endotermik pada 250 °C (air zeolitik)</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ketahanan kimia geopolimer</li> <li>- Geopolimer yang direndam asam sulfat 10% hanya mengalami penyusutan massa 0.1% perhari dan asam klorida 5% hanya menyebabkan penyusutan 1% perhari. Perendaman dengan KOH 50% hanya menyusut 0.02% perhari, larutan sulfat menyebabkan penyusutan 0.02% pada 28 hari, sedangkan larutan amonia tidak menyebabkan penyusutan massa pada geopolimer. Reaksi alkali agregat tidak terjadi pada geopolimer.</li> <li>- Nilai pH antara 11,5 s/d 12,5. Bandingkan dengan pasta semen Portland yang memiliki pH antara 12-13.</li> <li>- Pelarutan (<i>leaching</i>) dalam air, setelah 180 hari: K<sub>2</sub>O &lt; 0.015 %</li> <li>- Absorpsi air : &lt; 3%, tidak terkait pada permeabilitas</li> </ul>	

Sumber : Davidovit, 2008

Tabel 2.6 Perbandingan Sifat Fisik antara Binder *Ordinary Portland Cement* (OPC), *Magnesium Phosphat Cements* (MPCs) dan Geopolimer

Sifat Fisik	Jenis Binder		
	OPC	MPSs	Geopolimer
Kuat tekan (Psi)	3000 - 7000	8000 - 12000	5000 - 16000
Kuat bending (Psi)	250 - 1000	900 - 1700	300 - 2900
Toleransi pH	6,5 – 14	3 – 11	3-14
Toleransi garam	Tidak	Ya	Ya
Temperatur structural maks. (°F)	1500	2300	2000-2700
Waktu <i>curing</i> (demolding)	1 – 2 hari	10 menit - 2 jam	3 jam-3 hari
Waktu <i>curing</i> (kekuatan tinggi)	28 hari	3 hari	3 hari
Range temperatur <i>curing</i> (°F)	1500	1500	1500
Obligasi untuk dirinya sendiri	Tidak	Ya	Ya
Obligasi untuk penguatan	Tidak	Ya	Ya
Penyusutan setelah pengeringan	Ya	Tidak	Tidak
Koef. ekspansi termal	0,000012	0,00000017	~0,000001
Absorpsi Air	Ya	Tidak	Tidak
Foamable	Ya	Ya	Ya

Sumber : Sonafrank, 2010

## 2.2.6 Aplikasi Geopolimer

Banyaknya sifat-sifat unggul yang dimiliki oleh geopolimer menjadikan material ini dapat diaplikasikan dalam beberapa bidang industri. Sifat-sifat yang dimiliki oleh geopolimer dipengaruhi oleh struktur kimia yang terbentuk. Struktur kimia yang dimiliki material geopolimer mempengaruhi dalam aplikasinya terutama di bidang konstruksi. Salah satu faktor yang mempengaruhi struktur kimia yang dibentuk oleh geopolimer adalah rasio atom Si/Al dalam *polysialate*. Rasio Si/Al yang kecil menginisiasi jaringan tiga dimensi (3D) yang sangat kaku. Aplikasi geopolimer berdasarkan rasio Si/Al dapat dilihat pada Tabel 2.7.

Tabel 2.7 Aplikasi Geopolimer Berdasarkan Rasio Si/Al

Rasio Si/Al	Aplikasi
1	<i>Brick</i> , keramik, proteksi api
2	Semen dan <i>concrete</i> , pembungkus/kapsul untuk bahan radioaktif dan limbah berbahaya
3	<i>Fibre glass</i> komposit proteksi api, peralatan pengecoran, Komposit tahan panas (200 °C hingga 1000 °C) dan sebagai perkakas untuk preoses aeronautika titanium
> 3	Sealant untuk industri, 200 °C hingga 600 °C Perkakas untuk proses aeronautika aluminium SPF
20 – 35	Fiber komposit tahan api dan tahan panas

Sumber : Davidovits, 2011

Geopolimer juga dapat diaplikasikan ke dalam beberapa bidang seperti industri *automobile*, *aerospace*, metalurgi, pengecoran, teknik konstruksi dan sipil serta industri plastik. Selain itu geopolimer juga dapat diaplikasikan menjadi :

1. Resin dan pengikat geopolimer yang tahan api, sebagai isolasi termal, *refactory thermal shock*, sebagai cat, perkakas pada pembuatan komposit serat organik.
2. Bioteknologi, geopolimer dimanfaatkan sebagai bahan untuk aplikasi obat dan bahan alternative untuk menampung limbah radioaktif dan bahan beracun lainnya.
3. Bahan bangunan seperti semen, beton dan ubin keramik.
4. Bidang seni dan arkeologi, geopolimer dimanfaatkan sebagai artefak batu dekoratif maupun seni dan dekorasi lainnya.

### 2.2.7 Prekursor Geopolimer

Geopolimer dapat dibuat dari kaolin, metakaolin, *flay ash* batubara, dan material lain yang mengandung silika dan alumina. Pembuatan geopolimer berbahan dasar kaolin adalah cikal bakal dari pengembangan geopolimer (Komnitsas dan Zaharaki, 2007). Dua unsur utama geopolimer, yaitu sumber bahan dan cairan alkali. Bahan-bahan sumber geopolimer berdasarkan alumina-silikat yang kaya silikon (Si) dan aluminium (Al), dalam hal bisa mineral alami seperti kaolin, tanah liat, atau bahan produk sampingan seperti *fly ash*, silika fume, *slag*/terak, abu sekam padi, lumpur merah, dan lain-lain



Zat yang merupakan penyusun utama geopolimer adalah prekursor dan larutan alkali. Bahan baku atau prekursor geopolimer mengandung aluminosilikat/ alumina silikat yang harus kaya akan silikon (Si) dan aluminium (Al), dapat berupa mineral alami seperti kaolin, tanah liat, mika, andalusit, spinel dan lain sebagainya. Bahan dasar alternatif lainnya yang dapat digunakan sebagai prekursor adalah abu terbang, *silica fume*, abu sekam, *slag*, lumpur merah, limbah bauksit, dan sebagainya. Pilihan bahan dasar dipengaruhi oleh beberapa faktor antara lain ketersediaan material sumber, biaya, tipe aplikasi dan kebutuhan spesifik dari pemakai akhir.

Sifat bahan baku geopolimer merupakan salah satu faktor yang mempengaruhi sifat geopolimer yang dihasilkan. Apabila sifat dan kandungan unsur bahan baku diketahui maka hasil geopolimer dapat diprediksikan. Berbagai penelitian telah dilakukan tentang bahan baku atau prekursor geopolimer dengan sifat dan ciri khas yang berbeda-beda antara lain penelitian yang dilakukan oleh Palomo (2004). Penelitian ini mengklaim bahwa untuk mendapat sifat mengikat (*binding properties*) optimal, maka kandungan CaO harus rendah, memiliki silika reaktif antara 40-50%,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  tidak melebihi 10%, material tak terbakar kurang dari 5%, dan 80-90% partikelnya lebih kecil dari 45  $\mu\text{m}$ .

Pada masa awal pengembangannya, proses geopolimerisasi dilakukan dari bahan-bahan alumina silikat yang murni selanjutnya dilakukan dari mineral-mineral yang sifatsifat kimia dan fisiknya homogen seperti kaolin dan beberapa mineral aluminosilikat. Abu terbang yang mengandung sedikit CaO tetapi kaya akan alumina dan silikat akhir-akhir ini mulai dipakai sebagai reagen untuk sintesis dari geopolimer itu (Wallah dkk, 2006). Penggunaan kaolinit sebagai material asal dan NaOH dan KOH sebagai larutan alkali untuk membuat geopolimer telah dilakukan sejak tahun 1972 oleh Davidovits dan teknologi ini telah dipatenkan yang diberi nama '*SILICAFE process*' yang kemudian memperkenalkan *pure calcined kaolinite* yang diberi nama KANDOXI (*Kaolinite, Nacrite, Dickite OXIde*). Kaolinit jenis ini memiliki performa yang lebih baik dalam membentuk geopolimer dibandingkan kaolinit alami.

Penelitian lain seperti yang dilakukan oleh (Cheng dan Chiu, 2003) menggunakan *fly ash* dan *slag* sebagai prekursor, mempelajari pembuatan geopolimer tahan api dengan menggunakan *slag* yang berasal dari tanur tinggi yang telah digranulasi dan dikombinasikan dengan metakaolinit. Larutan alkali menggunakan kombinasi dari kalium hidroksida dan natrium silikat. Pada tahun 2008 Ioannis Maragkos menggunakan *slag* ferronickel yang berasal dari proses pirometalurgi pemurnian laterit sebagai prekursor dan NaOH sebagai larutan alkali dalam mensintesis geopolimer kemudian pada tahun 2011 Sakoi, Y mensintesis geopolimer dengan bahan *slag* ferronickel sebagai prekursor untuk diaplikasikan sebagai beton yang memiliki kekuatan yang tinggi. Tahun 2012 Komnitsas, K mensintesis geopolimer dengan menggunakan *slag* ferronickel sebagai prekursor yang disintesis dengan NaOH kemudian diberi logam berat untuk melihat pengaruh *toxicity* pada geopolimer dan Kalinkin, AM pada tahun yang sama menggunakan *slag* Cu-Ni sebagai prekursor untuk semen geopolimer diikuti oleh Pontikes, Y menggunakan *slag* dengan kandungan Al dan Fe yang tinggi sebagai prekursor dan NaOH sebagai larutan alkalinya. Hasil penelitian yang telah dilakukan menunjukkan hubungan antara konten prekursor dengan larutan alkali memberikan pengaruh terhadap sifat-sifat geopolimer seperti kekuatan tekan dan densitas serta struktur mikro dan fasa baru yang dibentuk.

Setiap prekursor yang digunakan dalam proses geopolimerisasi memiliki sifat tertentu dengan kelebihan dan kekurangan masing-masing. Penentuan prekursor yang digunakan dalam proses sintesis geopolimer merupakan salah satu faktor yang berpengaruh terhadap sifat geopolimer yang dihasilkan. Secara singkat pada Tabel 2.8 dapat dilihat klasifikasi berbagai prekursor geopolimer dengan keunggulan sifat masing-masing.

Tabel 2.8 Jenis Prekursor dan Sifat Geopolimer yang Terbentuk

No.	Peneliti (tahun)	Prekursor	Sifat
1.	Palomo, dkk (2004)	<i>Fly ash</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kemampuan mengikat yang tinggi</li> <li>- Memiliki kandungan silika yang reaktif (40-50%)</li> <li>- Tidak mudah terbakar</li> </ul>
2.	Davidovits (sejak 1972 hingga kini)	Kaolinit	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Performa baik dalam membentuk geopolimer</li> <li>- Resistan terhadap asam dan korosi.</li> <li>- Tahan terhadap api.</li> </ul>
3.	Cheng dan Chiu (2003), Maragkos (2008), Pontikes (2012)	<i>Slag</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Memiliki kekuatan yang tinggi</li> <li>- Densitas tinggi</li> </ul>

### 2.2.8 *Slag* (Terak)

*Slag* merupakan hasil residu pembakaran tanur tinggi, yang dihasilkan oleh industri peleburan mineral baik ferrous maupun nonferrous yang secara fisik menyerupai agregat kasar. *Slag* berupa lelehan campuran oksida logam dan silikat, terkadang mengandung fosfat, borat, sulfit, karbida dan halida yang diperoleh dari hasil peleburan mineral mengandung unsur-unsur yang tidak dapat direduksi dalam peleburan mineral. *Slag* dapat dikatakan sebagai limbah padat yang masih banyak mengandung unsur mineral (Syarif, N, 2010).

*Slag* terdiri dari beberapa jenis berdasarkan bentuk manufakturnya yaitu *slag* ferrous dan nonferrous sedangkan berdasarkan *waste treatment*-nya *slag* dibedakan menjadi tiga yaitu *heat-treated*, *melted-treated* dan *sewage-treated*. *Slag* ferrous terbagi menjadi dua bagian yakni Blast furnace *slag* (granulated BF *slag* dan Air-cooled Blast furnace *slag*) dan Steelmaking *slag* (BOF *slag* dan EAF *slag*), sedangkan *Slag nonferrous* terdiri dari copper-*slag*, ferronickel-*slag* dan lain sebagainya tergantung material *nonferrous*-nya. Komposisi kimia beberapa jenis *slag* ditampilkan pada Tabel 2.9.

Tabel 2.9 Komposisi Kimia Beberapa Tipe *Slag* (wt%)

Slag	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Mg	FeO	S	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Ket.
Blast furnace	42	34	13	7,4	0,4	0,8	<0,1	CaO/SiO <sub>2</sub> =1
BOF/steel making	46	11	2	6,5	17,4	0,1	1,7	CaO/SiO <sub>2</sub> =4
<i>Pre de-S</i>	50	10	2-10	2	7	1,5	<0,5	Ref. JFE
<i>Pre de-P</i>	35	25	5	5	15-25	<0,2	2,0-5,0	
<i>BOF</i>	45	15	3	5	15-20	<0,1	2,0	
<i>LF</i>	30-40	10-15	15-35	5-10	10-25	<0,1	<0,5	
EAF/steelmaking	23	12	7	4,8	29,5	0,2	0,3	Oxy/Melting Red/Refining
	55	19	17	7,3	0,3	0,4	0,1	
Andesite (rock)	6	60	17	2,8	3,1	-	-	
Portland Cement	64	22	6	1,5	3,0	2,0	-	

Sumber : Isawa, T, 2013

*Slag* memiliki nilai porositas air tinggi, dapat mengabsorpsi air lebih tinggi. Bertambahnya porositas, maka permukaan yang akan mengabsorpsi air bertambah luas sehingga bertambahnya permukaan menyebabkan jumlah yang diabsorpsi pun meningkat. Porositas *slag* terjadi akibat ruangan yang ditinggal oleh partikel air yang terlepas akibat pemanasan, tetapi tidak terdapat partikel halus yang menggantikan kedudukan partikel air. Rapat tataan terak yang lebih besar dapat diperoleh dengan mencampurkan butiran kasar dan halus. Porositas dikurangi karena yang halus mengisi rongga-rongga butiran kasarnya. Bila rongga tidak terisi merupakan tempat mengabsorpsi air. *Slag* yang absorpsi air lebih besar dari 2% dapat diklasifikasikan sebagai *slag* berpori/*porous*.

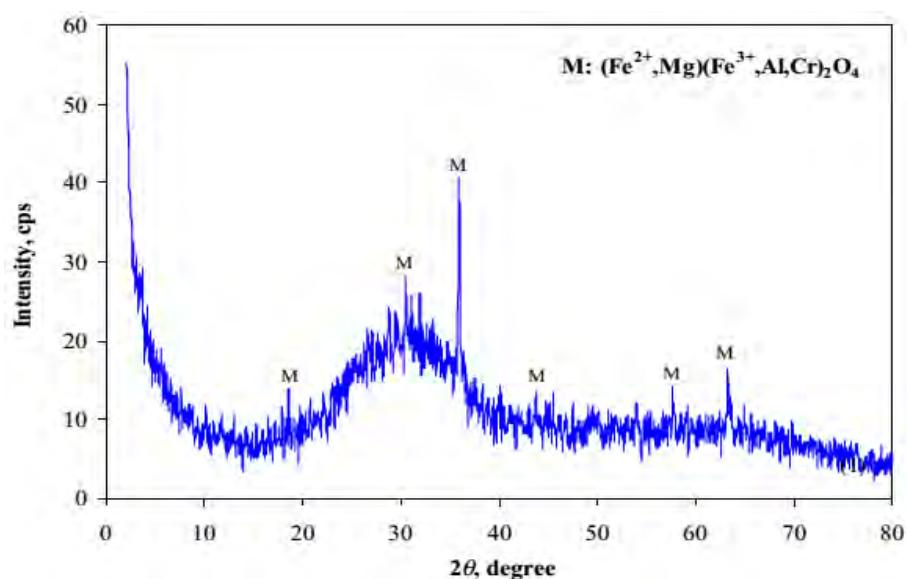
### 2.2.9 *Slag Ferronickel*

*Slag ferronickel* merupakan hasil sampingan industri yang dihasilkan selama pemurnian feronikel dari bijih nikel dan peleburan material seperti pada pembuatan baja dan paduan nikel (Sakoi dkk, 2011). Berdasarkan bentuk *slag* nikel/feronikel dikategorikan dalam tiga tipe: *high slag* yang diperoleh dari proses pemurnian di *converter* (berbentuk pasir halus dan berwarna coklat tua), *medium* dan *low slag* diperoleh dari hasil pemurnian menggunakan *furnace* yang dapat dilihat pada Gambar 2.5.



Gambar 2.4 Kategori *slag* berdasarkan bentuk (a) *High Slag* (b) *Medium/Low Slag*

Jika dilihat dari bentuk strukturnya *slag* akan ditemukan *slag* dengan struktur yang padat dan *slag* yang berpori. *Slag ferronickel* tersusun atas silikat amorf atau fase aluminosilikat seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.6 yang merupakan hasil X-Ray Difraktogram *slag* feronikel.



Gambar 2.5 X-Ray Difraktogram *Slag* Feronikel (Maragkos, I, 2008)

Selain bentuk dan struktur *slag* khususnya *slag* feronikel juga memiliki komposisi yang berbeda-beda tergantung pada proses produksi dan *raw material* yang digunakan. Komposisi *slag* feronikel yang berasal dari material masukan dan furnace yang digunakan selama proses pemurnian, sebagai contoh komposisi kimia *slag* ferronickel berasal dari Yunani yang diproduksi oleh LARCO dengan menggunakan *electric arc furnace* ditunjukkan Tabel 2.10.

Tabel 2.10 Komposisi Kimia dan Laju Produksi *Slag* Feronikel

Komposisi	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	Mn <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	MgO	CaO	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C	Co	Ni	Total
(% w/w)	32,74	8,32	37,69	0,44	2,76	3,73	3,07	0,11	0,02	0,1	95,27

Sumber : Komnitsas, K, 2012

Secara umum *slag* ferronickel mengandung beberapa unsur utama seperti SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO, CaO, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dan beberapa unsur lainnya dengan komposisi yang berbeda-beda tergantung dari material masukan utama yang digunakan dalam pemurnian dan proses peleburan. Banyaknya kandungan SiO<sub>2</sub> dan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> yang masih terdapat dalamnya menjadikan *slag* feronikel potensial untuk dimanfaatkan dalam pembuatan polimer anorganik atau geopolimer sehingga dapat diaplikasikan dalam berbagai bidang terutama bidang keteknikan.

#### 2.2.10 Larutan Alkalin (Aktivator)

Larutan alkalin merupakan larutan yang mengandung alkali (golongan IA pada susunan berkala unsur-unsur), misalnya litium (Li), Natrium (Na), Kalium (K) dan sebagainya. Larutan alkali bersifat basa atau memiliki pH kurang dari 7. Cairan alkali yang secara umum banyak digunakan dalam geopolimerisasi adalah gabungan dari natrium hidroksida (NaOH) atau kalium hidroksida (KOH) dan natrium silikat atau kalium silikat (Davidovits, 1999; Palomo dkk, 1999; Barbosa dkk, 2000; Swanepoel, 2002; Xu, 2002).

Palomo dkk (1999) menyimpulkan bahwa tipe larutan alkali berperan penting dalam proses geopolimerisasi. Reaksi terjadi pada laju yang tinggi ketika cairan alkali mengandung larutan silikat, natrium atau kalium silikat, dibandingkan dengan hanya menggunakan hidroksida alkali oleh Xu dan van Deventer (2002) yang menemukan bahwa penambahan larutan natrium silikat seperti cairan alkali dapat mempertinggi reaksi antara material sumber dan larutan. Selanjutnya setelah penyelidikan geopolimerisasi pada 16 mineral alami Al-Si, ditemukan bahwa secara umum larutan NaOH menyebabkan perluasan dissolution mineral yang lebih tinggi dibandingkan dengan larutan KOH.

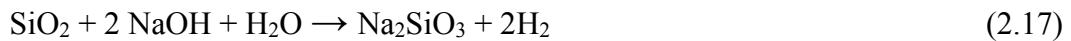
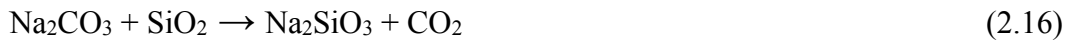
Davidovits (2008) mengusulkan bahwa cairan alkali yang digunakan untuk bereaksi dengan silikon (Si) dan Aluminium (Al) dari material geologi alami

atau bahan sampingan material seperti fly ash, blast furnace *slag* dan abu sekam padi untuk menghasilkan zat pengikat. Karena reaksi kimia yang terjadi dalam hal ini adalah geopolimerisasi maka disebutlah geopolimer untuk mewakili zat pengikat tersebut. Cairan alkali berasal dari logam alkali larut biasanya berbasis sodium atau kalium. Cairan alkali yang paling umum digunakan dalam geopolimerisasi adalah kombinasi dari natrium hidroksida (NaOH) atau kalium hidroksida (KOH) dan natrium silikat atau kalium silikat. NaOH dan KOH merupakan basa kuat yang mudah larut dalam air dan dapat melepas ikatan hidroksil serta membentuk ion sempurna. Kedua jenis alkali ini mampu bereaksi membentuk garam karbonat jika bertemu dengan CO<sub>2</sub> dari udara. KOH memiliki kelarutan dalam air 1100 g/L dan mampu melarutkan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dalam air membentuk AlO<sub>2</sub><sup>-</sup>. Selain itu larutan alkali juga mampu bereaksi dengan Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> membentuk endapan Fe(OH)<sub>3</sub> yang berwarna coklat kemerahan dan pada pH larutan yang semakin tinggi, larutan alkali juga mampu untuk melarutkan MnO.

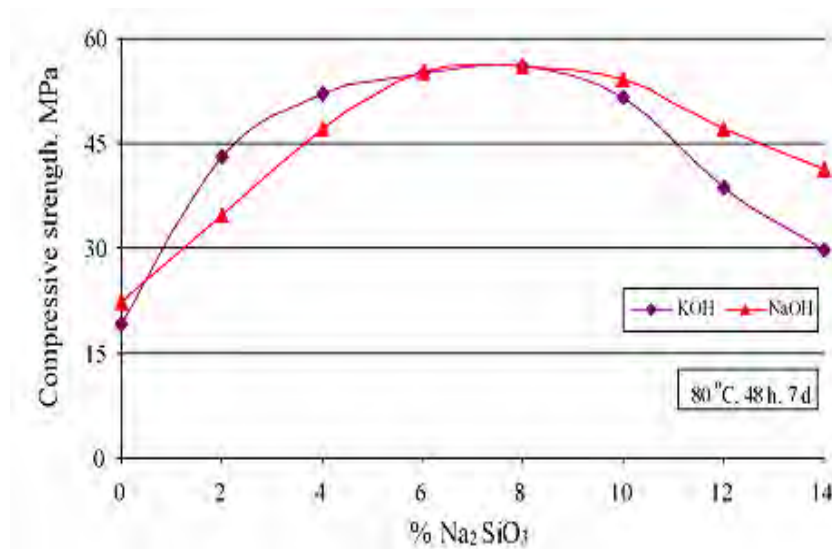
#### 2.2.11 Natrium Silikat (Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>)

Sodium atau natrium silikat, umumnya dikenal sebagai *waterglass* merupakan polimer silikon-oksigen yang mengandung komponen ion natrium (Na<sup>+</sup>). Pengaturan molekul tersebut berbeda dari bahan ionik yang khas seperti garam, yang didasarkan pada unit rumus disatukan oleh daya tarik listrik. Sebaliknya, natrium silikat mirip dengan plastik berbasis karbon karena obligasi silikon-oksigen-silikon antara masing-masing monomer yang kovalen. Polimer-seperti sifat natrium silikat matriks serta karakter kutub atom oksigen dan natrium memungkinkan untuk ikatan molekul air dalam matriks polimer. Oleh karena itu, produk natrium silikat sering ada di alotrop hydrous.

Natrium silikat umumnya berupa kristal putih yang dapat larut dalam air (soluble glass) sehingga menghasilkan larutan alkalin. Dalam larutan asam, ion silikat bereaksi dengan ion hydrogen untuk membentuk asam silikat dan bila dipanaskan akan membentuk silica gel yang keras, bening seperti kaca dan dapat menyerap air dengan cepat. Natrium silikat selalu stabil dalam larutan murni dan alkalin. Natrium silikat dengan rumus kimia Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> dapat disintesis dari pasir silica dengan menggunakan karbonat atau natrium hidroksida melalui reaksi :



Pada sintesis geopolimer natrium silikat sering digunakan sebagai aktivator untuk pembentukan gel aluminosilikat. Sifat-sifat geopolimer baik sifat fisik maupun mekanik sebagian dipengaruhi oleh tingkat konsentrasi larutan natrium silikat dalam pasta geopolimer. Selain itu natrium silikat juga berperan dalam perubahan mikrostruktur geopolimer yang dihasilkan dari proses sintesis. Sering kali ditemui dalam proses sintesis geopolimer larutan natrium silikat ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) ini dipadukan dengan natrium hidroksida ( $\text{NaOH}$ ) atau garam-garaman lain dalam konsentrasi tertentu digunakan untuk memodifikasi sifat fisik atau mekanik geopolimer. Seperti pada penelitian yang dilakukan oleh Komnitsas pada tahun 2008, dimana paduan larutan natrium silikat dan natrium hidroksida dapat memperbaiki sifat fisik dan mekanik geopolimer berbahan dasar slag yang dapat dilihat pada Gambar 2.7.



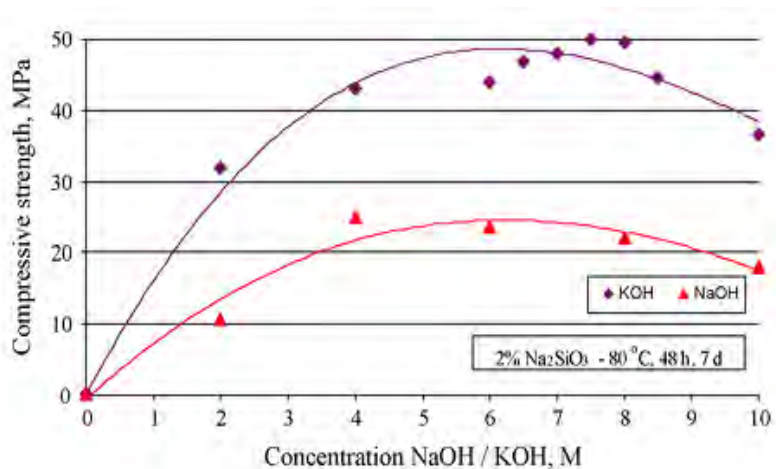
Gambar 2.6 Perubahan Sifat Mekanik Geopolimer Akibat Perubahan Konsentrasi Natrium Silikat (Komnitsas, 2008)



### 2.2.12 Natrium Hidroksida (NaOH)

Senyawa natrium hidroksida merupakan basa kuat yang sangat mudah larut dalam air. Senyawa ini juga dikenal sebagai soda api atau soda kaustik karena sifatnya yang licin dan panas jika menyentuh kulit. Karena memiliki sifat yang mudah larut maka NaOH sering digunakan sebagai reagen sumber ion hidroksida ( $\text{OH}^-$ ). NaOH dalam bentuk larutan dapat dibuat dengan melarutkan padatan/pelet NaOH dalam air. Konsentrasi larutan NaOH ditentukan dengan dari perbandingan massa padatan NaOH terhadap air dalam larutan.

Larutan ini juga sering digunakan untuk mempercepat proses pembubaran ion Si dan Al dari material sumber untuk pembentukan monomer geopolimer melalui kondensasi. Sama halnya dengan natrium silikat dalam proses geopolimerisasi NaOH juga dapat mempengaruhi sifat geopolimer khususnya sifat mekanik, sebagaimana yang ditampilkan pada Gambar 2.8 berikut :



Gambar 2.7 Perubahan Sifat Mekanik Geopolimer Akibat Perubahan Konsentrasi Natrium Hidroksida (Komnitsas, 2007)

## BAB 3

### METODE PENELITIAN

#### 3.1. Alat dan Bahan

Adapun alat dan bahan yang digunakan pada penelitian ini selengkapnya dapat dilihat pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1. Alat dan Bahan yang Digunakan untuk Sintesis Geopolimer

Alat	Bahan
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Lumpang</li> <li>- Martil</li> <li>- Ayakan uk. 50, 150 dan 200 mesh</li> <li>- Timbangan Digital</li> <li>- Gelas Ukur 500 dan 100 ml</li> <li>- Oven + Termokopel</li> <li>- Alat kompaksi manual</li> <li>- Wadah untuk membuat pasta semen</li> <li>- Spatula</li> <li>- Cetakan logam</li> <li>- Mixer</li> <li>- Mistar ukur</li> <li>- Jangka Sorong</li> <li>- Wadah kotak untuk uji serapan air</li> </ul>	<p>1. <i>Slag ferronickel</i> hasil pengolahan laterit nikel yang berasal dari PT. ANTAM Halmahera Timur Provinsi Maluku Utara yang dilakukan oleh Laboratorium Pengolahan Material Jurusan Teknik Material dan Metalurgi ITS.</p> <p>2. Larutan Aktivator sebagai berikut :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- NaOH 7 M</li> <li>- Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> 1,3 M</li> <li>- Air (H<sub>2</sub>O)</li> </ul>

#### 3.2. Prosedur Eksperimen

Prosedur eksperimen yang dilakukan pada penelitian ini terdiri dari beberapa bagian yakni : diagram alir penelitian dan rancangan penelitian. Prosedur eksperimen selengkapnya dijelaskan sebagai berikut :

##### - Rancangan Penelitian

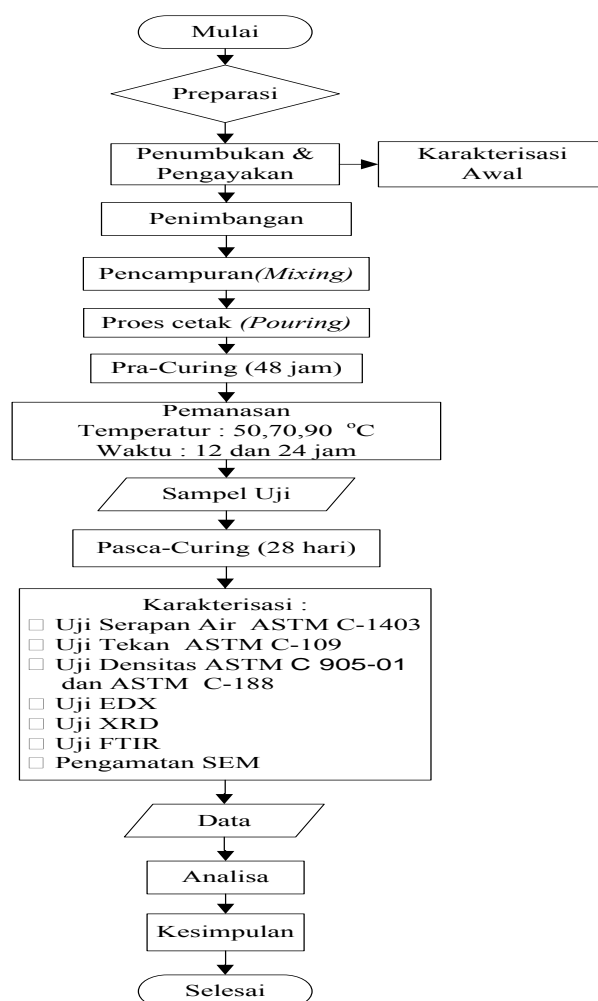
Pada penelitian ini pengujian dan karakterisasi sampel dilakukan dengan pengulangan masing-masing sebanyak tiga kali (3x) untuk setiap variasi temperatur dan waktu *curing*. Perencanaan penelitian ini yang akan dilakukan selengkapnya dapat dilihat pada Tabel 3.2.

Tabel 3.2 Rancangan Penelitian yang akan dilakukan

Kode Sampel	Kondisi				Uji <i>Properties</i> (Serapan air, Densitas, Kuat Tekan)	Karakterisasi Mikroskopik (XRD, FTIR, SEM, EDX)
	Pra-curing (jam)	Temp. curing (°C)	Waktu curing (jam)	Post-curing (hari)		
P <sub>1</sub> , P <sub>2</sub> , P <sub>3</sub>	48	50	12	28	√	√
P <sub>4</sub> , P <sub>5</sub> , P <sub>6</sub>	48	50	24	28	√	√
Q <sub>1</sub> , Q <sub>2</sub> , Q <sub>3</sub>	48	70	12	28	√	√
Q <sub>4</sub> , Q <sub>5</sub> , Q <sub>6</sub>	48	70	24	28	√	√
R <sub>1</sub> , R <sub>2</sub> , R <sub>3</sub>	48	90	12	28	√	√
R <sub>4</sub> , R <sub>5</sub> , R <sub>6</sub>	48	90	24	28	√	√

- *Diagram Alir Penelitian*

Langkah-langkah yang dilakukan dalam penelitian ini selengkapnya dapat dilihat pada diagram penelitian sebagaimana yang ditampilkan pad Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Diagram Alir Tahapan Penelitian

Penjelasan diagram alir penelitian :

1. Tahap awal yang dilakukan adalah preparasi berupa persiapan alat dan bahan yang akan digunakan yang terdiri dari persiapan bahan utama (prekursor) berupa *slag* feronikel hasil pengolahan laterit nikel yang berasal dari PT. ANTAM Halmahera Timur Provinsi Maluku Utara yang dilakukan oleh Laboratorium Pengolahan Material Jurusan Teknik Material dan Metalurgi ITS.
2. Sampel ditumbuk dengan menggunakan martil hingga diperoleh serbuk *slag*, kemudian diayak menggunakan *sieve*/ayakan dengan ukuran 50 mesh, dan 100 mesh emudin dilanjutkan dengan menggunakan ayakan 200 mesh hingga diperoleh serbuk *slag* dengan ukuran  $\pm 75 \mu\text{m}$ .
3. Sebelum ditimbang untuk disintesis serbuk *slag* terlebih dahulu dikarakterisasi untuk mengetahui struktur dan kandungan mineralnya dengan XRF dan XRD kemudian SEM untuk mengetahui gambaran awal struktur mikro *slag ferronickel* yang nantinya akan dibandingkan dengan *slag ferronickel* setelah disintesis menjadi geopolimer.
4. Persiapan untuk sintesis geopolimer : serbuk *slag* ditimbang sesuai dengan S/L rasio yang dibutuhkan (5,4 gr/ml) kemudian dicampur dengan larutan alkali (aktivasi mekanik dengan mixer), kemudian sampel dituang dalam cetakan. Besamaan dengan proses *pouring* juga dilakukan kompaksi manual agar diperoleh sampel yang benar-benar padat dan juga bertujuan untuk mengurangi *shrinkage*.
5. Sebelum dioven, terlebih dahulu dilakukan proses *pra-curing* selama 48 jam.
6. Sampel dioven (proses *curing*) sesuai dengan *setting* temperatur (50, 70 dan 90 °C) dengan waktu masing-masing selama 12 dan 24 jam.
7. Setelah *curing* sampel uji disimpan selama 28 hari (pasca curing) kemudian dilakukan pengujian dan karakterisasi agar diperoleh data hasil pengujian.
8. Data yang diperoleh kemudian dianalisa dan dibandingkan dengan beberapa referensi sehingga diperoleh kesimpulan.

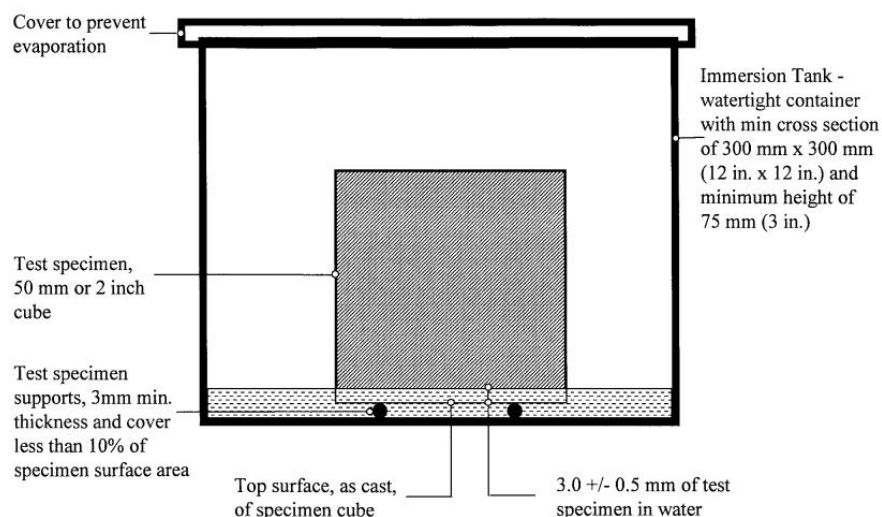
### 3.3. Pengujian dan Karakterisasi Sampel

Beberapa pengujian dan karakterisasi sampel dilakukan berupa uji sifat fisik yang terdiri dari uji serapan air dan uji densitas geopolimer, uji sifat mekanik berupa uji tekan dan karakterisasi kandungan unsur maupun senyawa serta mikrostruktur geopolimer dengan EDX, FTIR, XRD dan SEM. Selengkapnya prosedur pengujian dan karakterisasi sampel dapat dilihat pada penjelasan berikut :

#### 3.3.1. Uji Serapan Air (Water Absorption)

Pengujian serapan air/*water absorption* yang dilakukan mengacu pada ASTM C 1403. Adapun prosedur yang dilakukan adalah sebagai berikut :

- Menghitung luas permukaan sampel uji dengan mengukur panjang dan lebar sampel menggunakan jangka sorong (mm).
- Menimbang berat awal setiap sampel uji / *specimen* sebagai  $W_0$  (gram).
- Tempatkan tangki perendaman pada permukaan datar, sebelum memasukkan sampel uji dalam tangki perendaman diberi alas sebagai pengganjal agar sampel uji tidak kontak langsung dengan alas tangki perendaman, kemudian sampel uji dimasukkan ke dalam tangki perendaman seperti yang diilustrasikan pada Gambar 3.2 berikut :



Gambar 3.2 Konfigurasi Spesimen Selama Pengujian (ASTM C1403)

- d. Tambahkan air ke dalam tangki perendaman hingga sebagian sampel uji terendam setinggi  $3,0 \pm 0,5$  mm ( $0,12 \pm 0,02$  in), kemudian tangki perendaman ditutup untuk meminimalkan penguapan.
- e. Berat sampel uji diukur setelah direndam selama 0,25, 1, 4, dan 24 jam, dan dicatat sebagai  $W_T$  dimana T adalah waktu pengukuran dalam jam. Sebelum ditimbang permukaan dari tiap spesimen dibersihkan dari air dengan kain agar tidak ada sisa air pada permukaan sampel uji dalam waktu 10 detik dan penimbangan paling lama dilakukan dalam 1 menit.
- f. Setelah ditimbang, sampel uji dimasukkan kembali ke dalam tangki perendaman, untuk menjaga kedalaman perendaman diberi tambahan air seperti ditentukan dalam langkah (d). Menutup kembali tangki perendaman.

Penyerapan air dihitung dengan menggunakan Persamaan 3.1.

$$A_T = \frac{(W_T - W_0) \times 10000}{(L_1 \times L_2)} \quad (3.1)$$

dengan:

$W_T$  = berat sampel uji pada waktu T dalam gram (nst 0,1 g)

$W_0$  = berat awal sampel uji dalam gram (nst 0,1 g)

$L_1$  = panjang rata-rata permukaan sampel uji dalam mm (nst 0,5 mm)

$L_2$  = lebar rata-rata permukaan sampel uji dalam mm (nst 0,5 mm)

### 3.3.2. Uji Densitas (Kerapatan/Kepadatan)

Uji densitas geopolimer dilakukan dengan dua jenis yaitu : uji densitas mortar geopolimer berdasarkan prinsip Archimedes dengan mengacu pada ASTM C 905-01 dan uji densitas semen geopolimer berdasarkan prinsip Le Chatelier dengan mengacu pada ASTM C-188.

Pengujian densitas mortar berdasarkan ASTM C 905-01 dilakukan dengan langkah-langkah sebagai berikut :

- a. Benda uji dibersihkan untuk menghilangkan debu atau bahan-bahan lain yang melekat pada permukaannya, lalu ditimbang dan hasilnya dicatat sebagai berat benda uji di udara (S).

- b. Letakkan benda uji dalam keranjang yang terisi air atau ikat benda uji pada tali yang diberi penyangga kemudian timbang benda uji dalam air (benda uji + air) sebagai (I).
- c. Densitas mortar dihitung dengan menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$D_c = \frac{\rho \cdot S}{S - I} \quad (3.2)$$

dimana :

$D_c$  : densitas mortar ( $\text{g/cm}^3$ )

$\rho$  : densitas air ( $0,9975 \text{ g/cm}^3$ )

$S$  : berat benda uji kering di udara (g)

$I$  : berat benda uji dalam air (g)

Berdasarkan standard ASTM C-188, berat jenis semen yang disyaratkan melalui pengujian dengan metode *Le Chatelier* adalah  $3,15 \text{ gr/m}^3 - 3,25 \text{ gr/m}^3$ . Peralatan yang digunakan adalah botol *Le Chatelier*, kerosin bebas air, timbangan, termometer, air dengan suhu  $20^\circ \text{ C}$  seperti yang terlihat pada Gambar 3.3.



Gambar 3.3 Pegujian Densitas Semen (ASTM C-188)

Adapun langkah - langkah pengujian adalah sebagai berikut :

- a. Mengisi botol Le Chatelier dengan kerosin atau naptha sampai permukaan kerosin atau naptha dalam botol terletak pada skala antara 0 – 1, bagian dalam botol diatas permukaan cairan dikeringkan.
- b. Merendam botol-botol Le Chatelier (poin 1) ke dalam bak berisi air, lalu dibiarkan botol-botol itu terendam selama  $\pm 60$  menit agar suhu botol tetap dan suhu cairan dalam botol sama dengan suhu air;
- c. Setelah suhu cairan dalam botol dan air sama. Tinggi permukaan cairan terhadap skala botol, dibaca sebagai  $V_1$ .
- d. Benda uji dimasukkan sedikit demi sedikit ke dalam botol, harus diusahakan seluruh benda uji masuk ke dalam cairan dan diupayakan agar tidak ada massa semen yang menempel di dinding dalam botol di atas permukaan.
- e. Setelah seluruh benda uji dimasukkan, botol digoyangkan perlahan-lahan selama  $\pm 30$  menit, sehingga seluruh gelembung udara dalam benda uji ke luar.
- f. Rendam botol yang berisi benda uji dan cairan itu selama  $\pm 60$  menit, sehingga suhu larutan dalam botol sama dengan suhu air; lalu baca tinggi permukaan larutan pada skala botol, sebagai  $V_2$ .
- g. Berat jenis semen  $\rho$  dihirung dengan menggunakan rumus pada Persamaan (3.3) :

$$\rho = \frac{w}{V_2 - V_1} \quad (3.3)$$

dimana :

$\rho$  : Berat isi semen portland ( $\text{gr/cm}^3$ )

$w$  : Berat semen

$V_2 - V_1$  : volume kerosin atau naptha yang dipindahkan oleh benda uji.

### 3.3.3. Uji Tekan (Compressive Strength)

Uji tekan bertujuan untuk mengetahui sifat – sifat mekanik (kekuatan bahan) dan perubahannya terhadap beban/tekanan. Pengujian ini berdasarkan tipe pembebanan aktual yang diterima oleh material. Beberapa material memiliki kekuatan tarik yang rendah tetapi memiliki kekuatan tekan yang tinggi, seperti beton dan material getas lainnya. Pengujian ini mengakibatkan spesimen menjadi



mengkerut dan tertekan. Semakin panjang spesimen, fenomena penggembungan (buckling) dan aksi kolom (column action) semakin besar. Spesimen tekan memiliki bidang potong berbentuk sirkuler. Tetapi, beberapa material (seperti batu bata) sulit untuk mendapatkan bidang sirkuler. Maka, material ini diuji berdasarkan bentuk umumnya.

Pemilihan spesimen berdasarkan rasio panjang-terhadap-diameter (*length-to-diameter ratio*). Kestabilan spesimen menurun dengan meningkatnya tinggi/panjang spesimen. Batas praktis rasio panjang-terhadap-diameter adalah 2:1. Jika rasio panjang-terhadap-diameter berkurang, kekuatan tekan spesimen meningkat. Hal ini terjadi karena perpotongan bidang geser (slip) dan penekan. Perpotongan ini membatasi pergerakan bidang geser sehingga meningkatkan kekuatan tekan. Setelah pengujian, spesimen seharusnya berbentuk rata, paralel dan tegak lurus. Laju pengujian menggunakan 0,125 mm/min atau 0,005 in/min. Laju pengujian mempengaruhi hasil pengujian. Semakin tinggi laju pengujian, kekuatan semakin tinggi. Kuat tekan beton dihitung dengan menggunakan Persamaan (3.4).

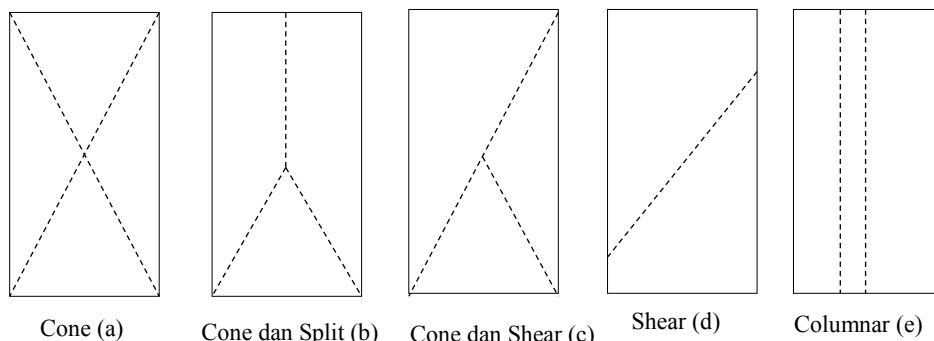
$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (3.4)$$

dimana :

$\sigma$  = kuat tekan beton (MPa)

P = beban maksimum (N)

A = luas bidang tekan (mm<sup>2</sup>)

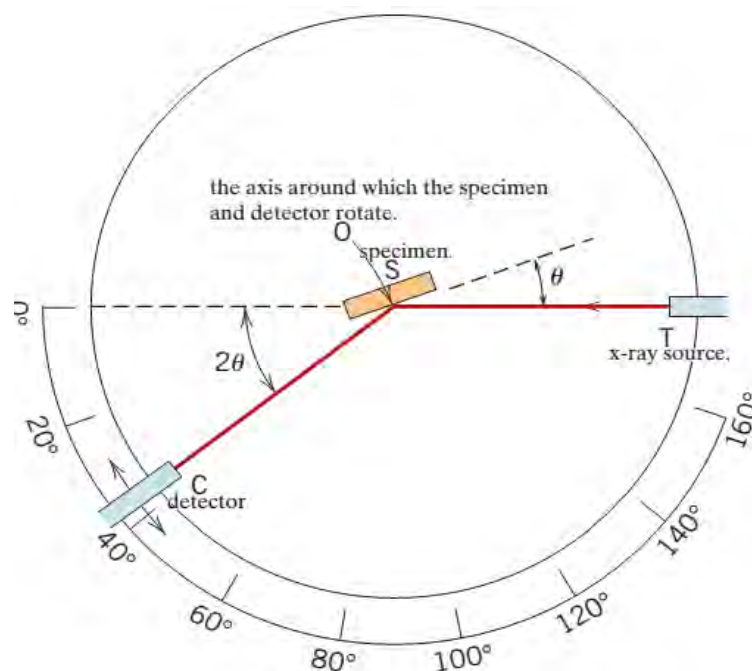


Gambar 3.4 Bagan Tipe Retakan (ASTM C 109)

### 3.3.4. Pengujian X-Ray Diffraction (XRD)

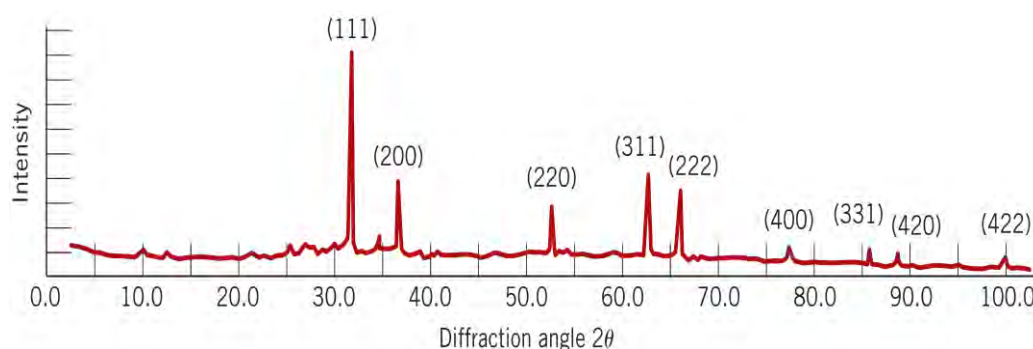
Pengujian ini menggunakan sinar-X untuk analisa komposisi fasa atau senyawa pada material dan untuk karakteristik kristal. Ketika berkas sinar-X berinteraksi dengan suatu material, maka sebagian berkas akan diabsorpsi, ditransmisikan dan sebagian lagi dihamburkan terdifraksi. Hamburan terdifraksi inilah yang dideteksi oleh XRD. Berkas sinar-X tersebut ada yang saling menghilangkan karena fasanya berbeda dan ada juga yang saling menguatkan karena fasanya sama. Berkas sinar-X yang saling menguatkan itulah di sebut berkas difraksi.

Pengujian XRD menggunakan beberapa komponen di dalamnya yaitu generator tegangan tinggi yang berfungsi sebagai pembangkit daya sumber sinar-X pada bagian *x-ray tube*. Wadah tempat menyimpan sampel padat dan serbuk yang telah dimampatkan yang dapat diatur posisinya. Proses kerjanya dimulai dari berkas sinar-X yang ditembakkan ke sampel kemudian sinar-X didifraksikan oleh sampel, berkas sinar-X ini selanjutnya masuk ke alat pencacah kemudian intensitas difraksi sinar-X ditangkap oleh detektor dan diterjemahkan dalam bentuk kurva. Secara umum prinsip kerja XRD dapat dilihat pada Gambar 3.5.



Gambar 3.5 Skema Kerja *X-Ray Diffraction* (Callister,Jr, 2008)

Interpretasi konstruktif radiasi sinar-X yang telah dideteksi detektor selanjutnya akan diperkuat gelombangnya dengan menggunakan *amplifier*. Selanjutnya interpretasi konstruktif radiasi sinar-X tersebut akan terbaca secara spektroskopi sebagai puncak-puncak seperti yang ditampilkan pada Gambar 3.6.



Gambar 3.6 Ilustrasi Grafik Hasil Pengujian XRD (Callister,Jr, 2008)

Dengan menganalisis puncak-puncak grafik tersebut maka kandungan material dan struktur kristal serta komponen- komponen kristalografinya dapat diketahui. Dan dari data hasil grafik dapat diperoleh persamaan untuk menghitung ukuran kristal sesuai dengan persamaan Debye Scherrer yang ditunjukkan pada Persamaan (3.5).

$$D = \frac{0.9\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (3.5)$$

dimana:

D : Ukuran kristal (Å)

$\lambda$  : Panjang gelombang radiasi (Å); ( $\lambda$  CuK  $\alpha$ =1,54056Å)

B : *Full Width at Half Maximum* (rad); ( $1^\circ = 0,01745$  rad)

$\theta$  : Sudut Bragg ( $^\circ$ )

Analisa kualitatif tidak hanya mengidentifikasi unsur apa saja yang ada dalam sampel, tetapi juga konsentrasi unsur tersebut. Untuk melakukan analisa kuantitatif maka perlu dilakukan beberapa proses seperti meniadakan *background*, *dekonvolusi peak* yang bertumpang tindih dan menghitung konsentrasi unsur seperti yang tercantum pada Tabel 3.3.

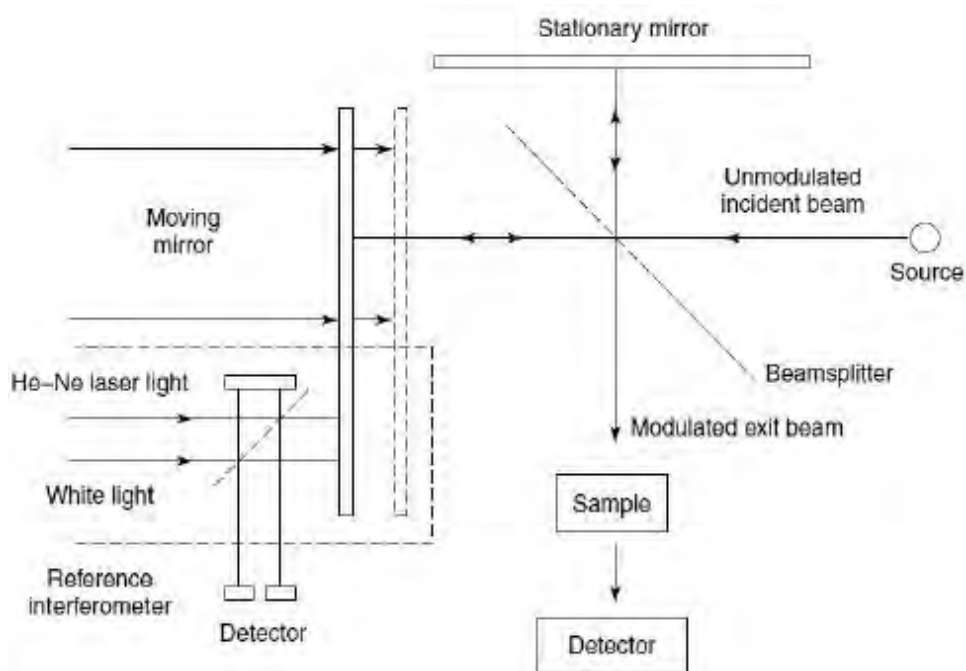
Tabel 3.3 Informasi yang Dihasilkan dari Difraksi XRD

No	Karakter	Informasi dari Material	Informasi dari Instrumen
1.	Posisi Puncak (2 $\theta$ )	Fasa kristal/Identifikasi Struktur kristal Parameter kisi Regangan seragam	Kesalahan 2 $\theta$ Penempatan posisi sampel kurang tepat
2.	Tinggi Puncak (Intensitas)	Identifikasi Komposisi Hamburan tak koheren <i>Extinction</i> <i>Preferred orientation</i>	
3.	Lebar dan bentuk puncak	Ukuran kristal (bukan partikel atau grain) Distribusi ukuran	Duplet radiasi Divergensi aksial Kedataran permukaan sampel

Sumber : (Pratapa, 2004)

### 3.3.5. Pengujian Fourier Transform Infra Red (FTIR)

Pengujian FTIR dilakukan untuk mengetahui informasi terkait ikatan kimia yang ada pada AlN. Ikatan kimia tersebut diindikasikan dengan puncakpuncak yang berbeda. Skema dari pengujian FTIR dapat dilihat pada Gambar 3.7.



Gambar 3.7 Skema Pengujian FTIR (Stuart. B, 2004)

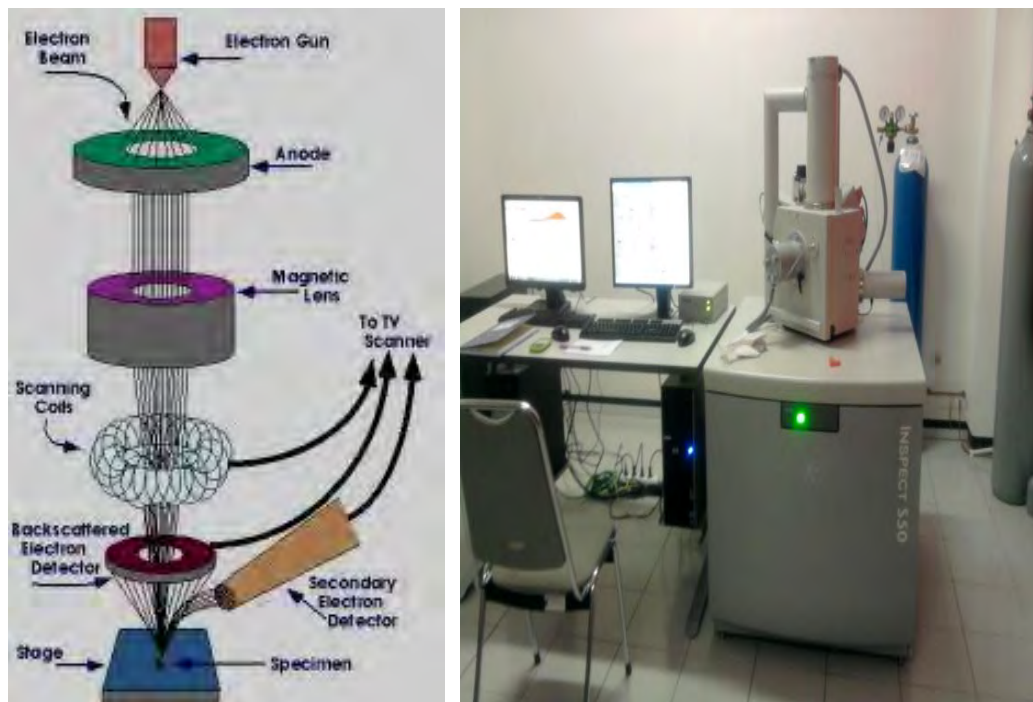
Prinsip kerja dari alat uji FTIR yakni : sinar infra merah yang berperan sebagai sumber sinar, dibagi menjadi dua berkas, satu dilewatkan melalui sampel, dan yang lain melalui pembanding. Kemudian, secara berturut-turut melewati *chopper*. Setelah melalui prisma, berkas jatuh pada detektor dan diubah menjadi sinyal listrik yang kemudian direkam oleh rekorder, *amplifier* digunakan apabila sinyal yang dihasilkan sangat lemah. Serapan cahaya oleh molekul tergantung pada struktur elektronik dari molekul tersebut. Pada temperatur kamar, molekul senyawa organik dalam keadaan diam, tiap ikatan memiliki karakter frekuensi untuk terjadinya vibrasi ulur (*stretching vibration*) dan vibrasi tekuk (*bending vibration*) dimana infra merah dapat diserap pada frekuensi tersebut. Energi ulur (*stretch*) suatu ikatan nilainya lebih besar dari pada energi tekuk (*bending*). Sehingga serapan ulur suatu ikatan muncul pada frekuensi tinggi dalam spektrum inframerah dibandingkan serapan tekuk dari satu ikatan yang sama. (Jatmiko dkk, 2008). Oleh sebab itu, spektroskopi inframerah dapat digunakan untuk identifikasi analisa secara kualitatif dari tiap material yang berbeda. Ukuran puncak yang terbentuk dalam spektrum juga memberikan indikasi langsung dari jumlah ikatan atom pada suatu sampel. Komponen alat uji FTIR dapat dilihat pada Gambar 3.8.



Gambar 3.8 Mesin FTIR *Thermo Scientific iS10*

### 3.3.6. Scanning Electron Microscope (SEM)

*Scanning Electron Microscope* adalah jenis mikroskop yang menampilkan gambar morfologi sampel dengan memanfaatkan sinar elektron berenergi tinggi dalam pola *raster scan*. Cara kerja SEM adalah dengan menembakkan elektron dari *electron gun* lalu melewati *condensing lenses* dan pancaran elektron akan diperkuat dengan sebuah kumparan, setelah itu elektron akan difokuskan ke sampel oleh lensa objektif yang ada di bagian bawah. Pantulan elektron yang mengenai permukaan sampel akan ditangkap oleh *backscattered electron detector* dan *secondary electron detector* yang kemudian diterjemahkan dalam bentuk gambar pada *display*. SEM digunakan untuk mengkarakterisasi morfologi serta ukuran partikel dari material geopolimer slag ferronickel yang telah dipanaskan dengan berbagai variasi waktu dan temperatur



Gambar 3.9 Mekanisme Kerja dan Mesin *Scanning Electron Microscope* (SEM)

*(halaman ini sengaja dikosongkan)*

## BAB 4

### HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini akan dipaparkan hasil penelitian yang telah dilakukan berupa produk dari hasil sintesis slag ferronickel menjadi geopolimer serta beberapa pengujian dan karakterisasi untuk mengetahui transformasi dan struktur mikroskopik geopolimer yang dihasilkan akibat variasi temperatur dan waktu curing terhadap sifat fisik-mekanik semen geopolimer.

#### 4.1 Produk Geopolimer

Geopolimer yang dihasilkan pada penelitian ini merupakan sintesis *slag ferronickel* menggunakan larutan silikat dengan variasi temperatur *curing* 50,70 dan 90 °C selama 12 dan 24 jam. Produk geopolimer yang dihasilkan dapat dilihat pada Gambar 4.1.



Gambar 4.1 Hasil Sintesis Geopolimer

Dari tampilan secara fisik produk geopolimer pada temperatur dan waktu *curing* yang berbeda menghasilkan geopolimer dengan tingkat kekeringan dan warna yang berbeda, dimana produk geopolimer pada temperatur *curing* yang lebih rendah (50 °C) memiliki warna yang lebih gelap (cenderung hitam) dengan kekeringan yang lebih rendah jika dibandingkan dengan geopolimer pada temperatur yang lebih tinggi (70 dan 90 °C). Selain itu produk geopolimer dengan temperatur yang lebih rendah memiliki penyusutan massa yang lebih berat dibandingkan dengan geopolimer dengan temperatur yang lebih tinggi.



## 4.2 Hasil Karakterisasi X-ray Diffraction (XRD)

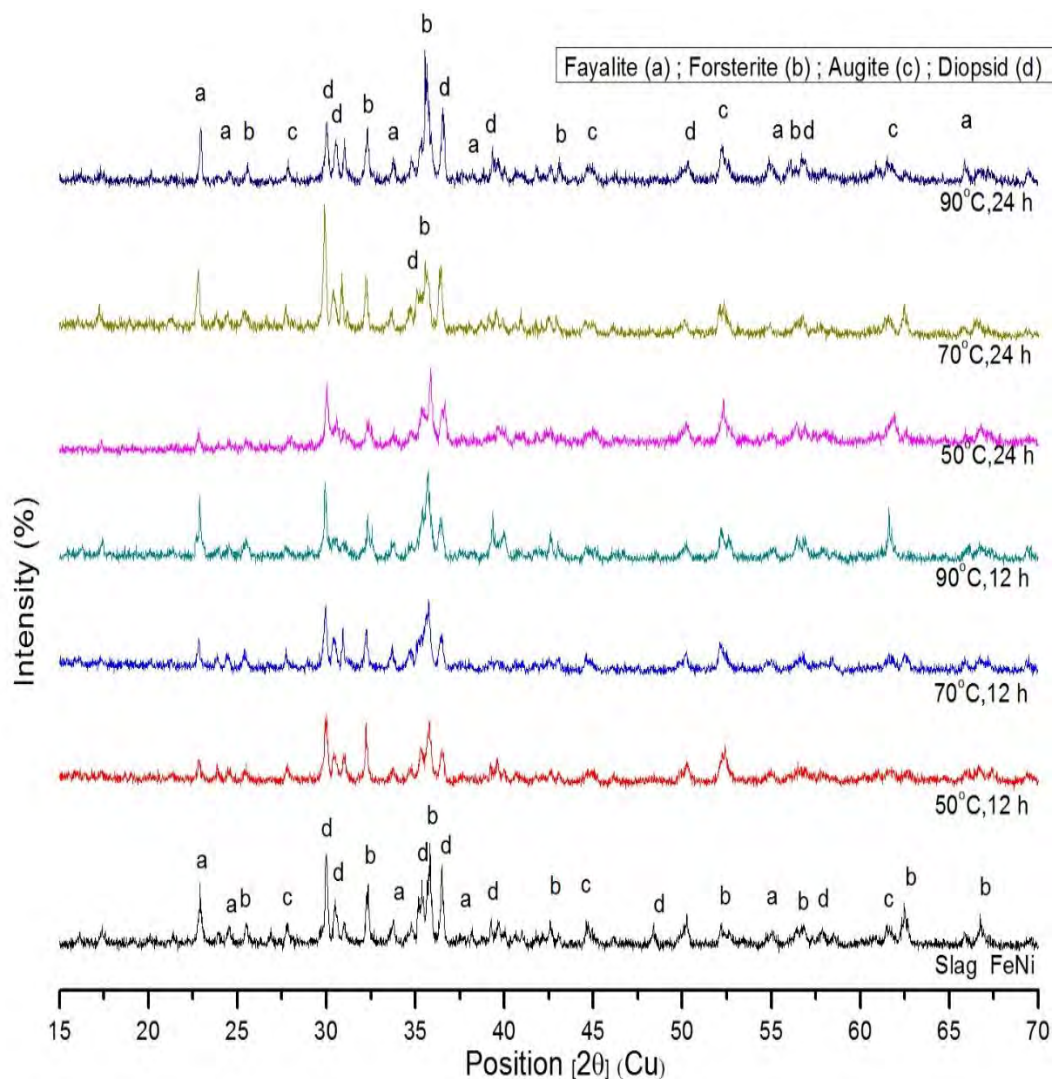
Pada penelitian ini karakterisasi dengan XRD dilakukan pada *slag ferronickel* dan sampel geopolimer. Karakterisasi dengan XRD pada *slag ferronickel* dilakukan untuk mengetahui komposisi senyawa dan kandungan mineral yang terdapat didalamnya sehingga estimasi S/L rasio (5,4 gr/ml) untuk larutan silikat dan slag dapat dilakukan, sedangkan pada sampel geopolimer karakterisasi dengan XRD selain untuk mengetahui komposisi senyawa juga untuk melihat perubahan struktur atau fasa yang dapat terjadi dalam sampel.

Berdasarkan hasil analisa diperoleh bahwa kandungan senyawa mineral yang dimiliki oleh *slag ferronickel* merupakan senyawa kompleks berupa gabungan dari senyawa *augite* [(Ca, Na)(Mg, Fe, Al, Ti)(Si, Al)<sub>2</sub>O<sub>6</sub>, PDF no. 41-1483], *diopside* [Ca(Mg, Al) (Si,Al)<sub>2</sub>O<sub>6</sub>, PDF no. 41-1370] dan *fayalite/iron silicate* [Fe<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>, PDF #72-0460] dan senyawa *forsterite* [(Mg, Fe)<sub>2</sub> SiO<sub>4</sub>, PDF no. 31-0795] yang merupakan kelompok senyawa *olivine*. Sebagaimana yang diungkapkan oleh (Yang dkk, 2014) bahwa senyawa slag nikel dan ferronickel umumnya mengandung mineral *forsterite* dengan kadar kandungan magnesium yang tinggi, pada penelitian ini kandungan mineral yang dominan terdapat dalam *slag ferronickel* yang digunakan sebagai bahan baku juga didominasi oleh senyawa *forsterite* berkadar magnesium tinggi. Meskipun banyak mengandung unsur-unsur lain dalam senyawa yang terdapat didalamnya, adanya unsur Si dan Al yang terkandung dalam slag ferronickel menjadikan material ini dapat digunakan sebagai bahan dasar dalam pembuatan semen geopolimer.

Pada sampel geopolimer, berdasarkan analisa XRD diperoleh bahwa kandungan senyawa yang ada di dalamnya tidak jauh berbeda dengan kandungan senyawa yang terdapat di dalam slag. Secara konvensional hasil XRD geopolimer umumnya memiliki struktur amorf atau semi kristal dengan pola struktur yang mirip dengan zeolite dan memiliki puncak halo pada 2 $\theta$  antara 27° - 29° (Davidovits, 1996). Akan tetapi pada penelitian lain ditemukan adanya pergeseran puncak halo berada pada 2 $\theta$  (20 – 40°). Pergeseran puncak halo ke nilai 2 $\theta$  yang lebih tinggi mengindikasikan adanya pembubaran parsial fasa amorf pada slag dan pembentukan fasa amorf baru pada geopolimer. Adanya puncak halo yang baru di dalam geopolimer disebabkan oleh fenomena polikondensasi dalam fase cair

aluminosilikat yang dihasilkan karena pembubaran parsial dari fase amorf slag (Maragkos dkk, 2008).

Dari hasil karakterisasi XRD pada produk geopolimer berbahan *slag ferronickel* ditemukan bahwa perubahan temperatur dan waktu *curing* tidak merubah komposisi senyawa yang terdapat di dalam geopolimer. Dimana pada sampel geopolimer ditemukan keberadaan puncak-puncak kristalin yang sama dengan puncak kristalin pada slag. Adanya puncak-puncak kristalin yang terdapat pada geopolimer tersebut merupakan pengaruh dari kandungan senyawa dalam bahan baku yang digunakan yakni *slag ferronickel*. Hasil XRD *slag ferronickel* dan sampel geopolimer dapat dilihat pada Gambar 4.2.



Gambar 4.2 Hasil XRD *Slag Ferronickel* dan Geopolimer pada Beberapa Variasi Temperatur dan Waktu Curing.

Sama halnya pada geopolimer yang berasal dari *fly ash*, geopolimer berbahan slag juga memiliki kandungan awal berupa kalsium (Ca), Magnesium (Mg) dan zat besi (Fe) serta elemen-elemen lain yang turut mengambil bagian dalam proses geopolimerisasi baik dalam proses pengintegrasian maupun sebagai atom pengisi dalam kristal. Berdasarkan penelitian sebelumnya, keberadaan unsur kalsium (Ca) dalam struktur geopolimer dapat membantu meningkatkan sifat mekanik dan mengurangi porositas mikro yang dihasilkan dari pembentukan gel Ca-Al-Si dalam geopolimer, demikian pula halnya pada Magnesium (Mg) dan besi (Fe) yang dalam kadar tertentu dapat membantu meningkatkan sifat mekanik geopolimer (Lemougna dkk, 2011).

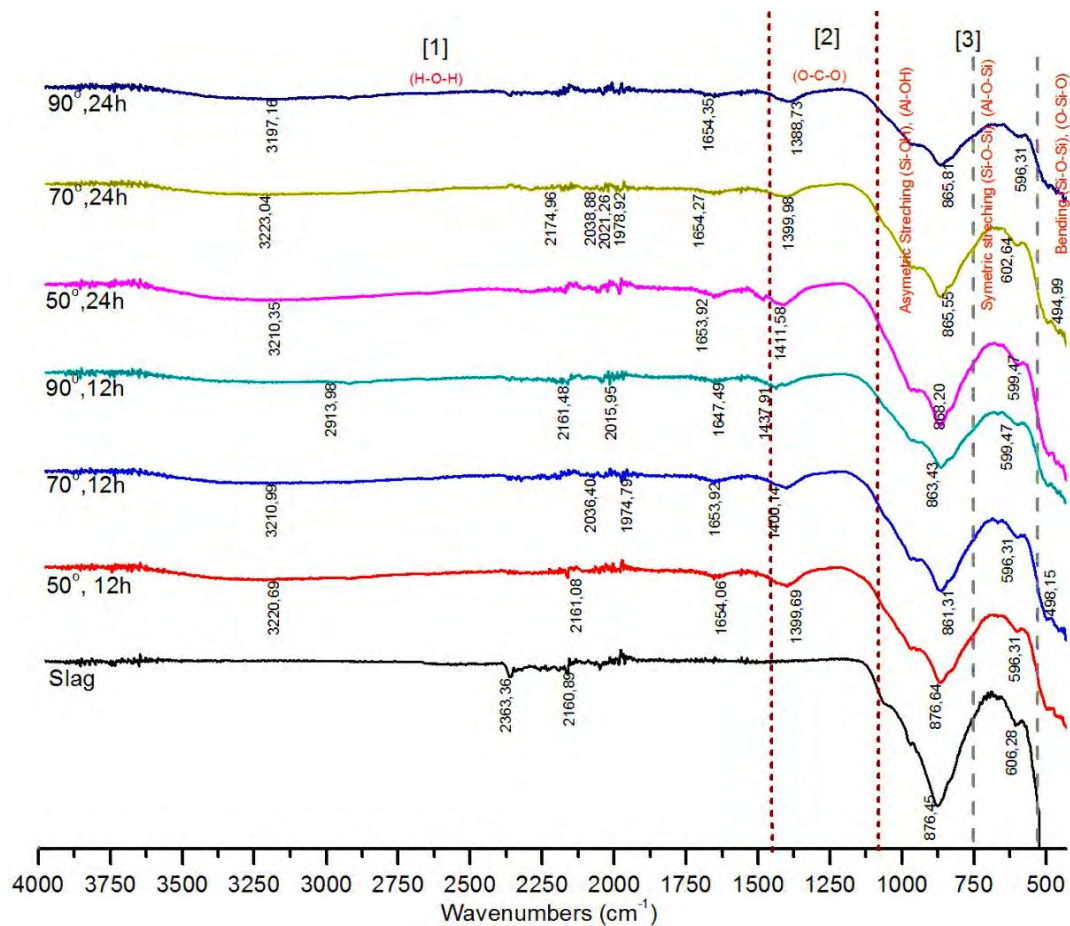
Meskipun memiliki puncak-puncak kristal yang sama dengan yang dimiliki oleh slag, namun intensitas puncak difraksi pada geopolimer mengalami perubahan untuk setiap perubahan temperatur dan waktu *curing*. Hal ini dapat dilihat melalui nilai dari lebar setengah puncak (FWHM) yang dibentuk oleh slag dan geopolimer khususnya pada rentang  $2\theta$  ( $20^\circ - 40^\circ$ ) yang dapat dilihat pada Lampiran 2 (a).

Berdasarkan data pada Lampiran 2 (a) tersebut, maka dapat dilihat bahwa nilai FWHM geopolimer secara umum mengalami peningkatan jika dibandingkan dengan nilai FWHM slag ferronickel. Sebagaimana diketahui bahwa jika nilai FWHM semakin tinggi maka material cenderung bersifat amorf demikian pula sebaliknya. Adanya kecenderungan FWHM yang semakin tinggi maka dapat dikatakan bahwa geopolimer tersebut cenderung bersifat amorf. Sementara puncak-puncak kristal yang terekam dari hasil XRD merupakan puncak-puncak karakteristik *slag ferronickel* yang tidak dapat dibubarkan selama proses geopolimerisasi. Selain itu, berdasarkan hasil tersebut juga dapat menunjukkan bahwa telah terjadi pembentukan fase amorf alumino-silikat dalam geopolimer yang dihasilkan (Elimbi dkk, 2011).

### 4.3 Hasil Karakterisasi Fourier Transform Infra Red (FTIR)

Sebagaimana yang telah dijelaskan pada sub-bab sebelumnya bahwa geopolimer yang dihasilkan pada penelitian ini memiliki kecenderungan memiliki fasa amorf. Fasa amorf yang terbentuk merupakan fenomena polikondensasi selama proses geopolimerisasi yang menyebabkan pembubaran parsial fasa amorf pada slag yang dihasilkan dengan penambahan larutan aluminosilikat. Fenomena tersebut dapat diperjelas melalui analisa spektroskopi FTIR pada slag dan geopolimer yang dihasilkan.

Analisa hasil karakterisasi FTIR pada slag ferronickel dan geopolimer dilakukan dengan membagi grafik spektrum FTIR ke dalam tiga bagian. Bagian pertama [1] dengan range bilangan gelombang ( $>1600\text{ cm}^{-1}$ ) merupakan wilayah yang berkaitan dengan molekul air (H-O-H). Munculnya puncak serapan pada bagian ini menunjukkan masih adanya kandungan air yang terdapat dalam material geopolimer. Bagian kedua [2] dengan range bilangan gelombang antara ( $1300 - 1600\text{ cm}^{-1}$ ) yang merupakan wilayah yang menunjukkan getaran *stretching*/regangan dari ikatan (O-C-O). Keberadaan puncak serapan pada wilayah ini menunjukkan adanya gugus karbonat dalam material geopolimer yang terbentuk selama proses geopolimerisasi dengan variasi temperatur dan waktu *curing*. Terakhir adalah bagian ketiga [3] yang merupakan wilayah utama dari proses geopolimerisasi yang berada pada rentang bilangan gelombang kurang dari ( $1300\text{ cm}^{-1}$ ) dimana pada bilangan gelombang antara ( $970 - 1090\text{ cm}^{-1}$ ) merupakan getaran dari regangan asimetris (Si-O-Si), bilangan gelombang antara ( $550 - 750\text{ cm}^{-1}$ ) merupakan spektrum bagi regangan simetris (Si-O-Si) dan (Al-O-Si), sedangkan pada bilangan gelombang antara ( $460-510\text{ cm}^{-1}$ ) merupakan spektrum bagi getaran *bending*/lentur (Si-O-Si) dan (O-Si-O) (Maragkos dkk, 2008). Spektrum FTIR dari *slag ferronickel* dan produk geopolimer dapat dilihat pada Gambar 4.3.



Gambar 4.3 Spektrum FTIR *Slag Ferronickel* dan Geopolimer pada Beberapa Variasi Temperatur dan Waktu Curing.

Berdasarkan Gambar 4.3 tersebut diatas, maka dapat dilihat bahwa pada bagian [3] terdapat pergeseran bilangan gelombang pada masing-masing pita serapan. Menurut (Maragkos dkk, 2008) pergeseran arah pita serapan ini baik ke arah yang lebih rendah maupun ke arah yang lebih tinggi menunjukkan adanya pembubaran material padat dari slag yang disebabkan oleh larutan alkali selain itu pergeseran arah pita serapan juga menunjukkan adanya pembentukan fasa aluminosilikat baru yang terjadi selama proses geopolimerisasi. Pada pita serapan *slag ferronickel* puncak serapan regangan simetris (Si-O-Si) dan (Al-O-Si) muncul pada bilangan gelombang 606,28  $\text{cm}^{-1}$  dan regangan asimetris (Si-O-Si) pada bilangan gelombang 876,45  $\text{cm}^{-1}$ . Pada geopolimer dengan temperatur 50 °C dan waktu *curing* selama 12 jam serapan regangan simetris (Si-O-Si) dan (Al-O-Si) bergeser pada bilangan gelombang 596,31  $\text{cm}^{-1}$  dengan regangan asimetris (Si-O-Si) pada bilangan gelombang 867,64  $\text{cm}^{-1}$ . Selanjutnya dengan waktu

pemanasan yang ditingkatkan menjadi 24 jam pada temperatur *curing* 50 °C pergeseran pita serapan regangan simetris (Si-O-Si) dan (Al-O-Si) pada bilangan gelombang 599,47 cm<sup>-1</sup> dan regangan asimetris (Si-O-Si) pada bilangan gelombang 868,20 cm<sup>-1</sup>. Pergeseran puncak serapan pada bilangan gelombang 596,31 cm<sup>-1</sup> ke bilangan gelombang 599,47 cm<sup>-1</sup> menunjukkan bahwa terjadi penambahan rantai polisialat dalam produk geopolimer. Selain itu puncak serapan pada bilangan gelombang 867,64 cm<sup>-1</sup> yang meningkat tipis menjadi 868,20 cm<sup>-1</sup> mengindikasikan adanya kemunculan fasa amorf baru yang dipengaruhi oleh penambahan larutan silikat dalam proses geopolimerisasi. Hal ini juga dapat dilihat pada temperatur 90 °C pergeseran serapan regangan simetris (Si-O-Si) dan (Al-O-Si) dengan waktu *curing* 12 jam puncak serapan terdapat pada bilangan gelombang 599,47 cm<sup>-1</sup> menjadi 596,31 cm<sup>-1</sup> pada waktu *curing* 24 jam. Sementara regangan asimetris (Si-O-Si) dengan waktu *curing* 12 jam muncul pada bilangan gelombang 863,43 cm<sup>-1</sup> dan bergeser pada bilangan gelombang 865,81 cm<sup>-1</sup> pada waktu *curing* 24 jam (Komnitsas dkk, 2008). Hal yang sedikit berbeda terjadi pada temperatur *curing* 70 °C, dimana untuk waktu *curing* 12 jam selain puncak serapan regangan simetris (Si-O-Si) dan (Al-O-Si) pada bilangan gelombang 596,31 cm<sup>-1</sup> dan regangan asimetris (Si-O-Si) pada bilangan gelombang 861,63 cm<sup>-1</sup> juga terdapat puncak serapan *bending*/lentur (Si-O-Si) dan (O-Si-O) pada bilangan gelombang 498,15 cm<sup>-1</sup>. Selain adanya pergeseran pada puncak-puncak serapan yang mengindikasikan munculnya fasa amorf baru, adanya puncak serapan berupa ikatan senyawa (Si-O-Si) dan (O-Si-O) menunjukkan bahwa pada kondisi ini monomer yang akan membentuk gel aluminosilikat yang dihasilkan lebih banyak dibanding pada kondisi lainnya.

#### 4.4 Hasil Karakterisasi *Energy Dispersive X-Ray* (EDX)

Sebagaimana yang dilakukan pada pengujian sebelumnya karakterisasi dengan Energy Dispersive X-Ray (EDX) juga dilakukan pada *slag ferronikel* untuk mengetahui komposisi senyawa khususnya unsur Si dan Al didalamnya. Selain untuk mengetahui komposisi unsur karakterisasi EDX pada *slag ferronickel* juga bertujuan untuk mengetahui berapa besar kandungan oksida yang terdapat di dalam slag ferronickel dimana senyawa ini merupakan senyawa yang berperan penting

dalam pembentukan geopolimer untuk membentuk ikatan Al-O-Si, hal ini juga bertujuan untuk memudahkan dalam mengestimasi kebutuhan bahan yang akan digunakan dalam proses geopolimerisasi dalam hal ini estimasi S/L rasio (5,4 gr/ml) untuk larutan silikat dan slag dapat dilakukan. Hasil karakterisasi unsur yang terkandung dalam slag ferronickel dapat dilihat pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Komposisi Unsur yang Terkandung dalam *Slag Ferronickel*

Unsur	% Massa	% At
O K	37.48	53.85
Mg K	12.23	11.53
Al K	5.25	4.48
Si K	21.87	17.92
Ca K	16.06	9.27
Fe K	7.11	2.94
Total	100.00	100.00

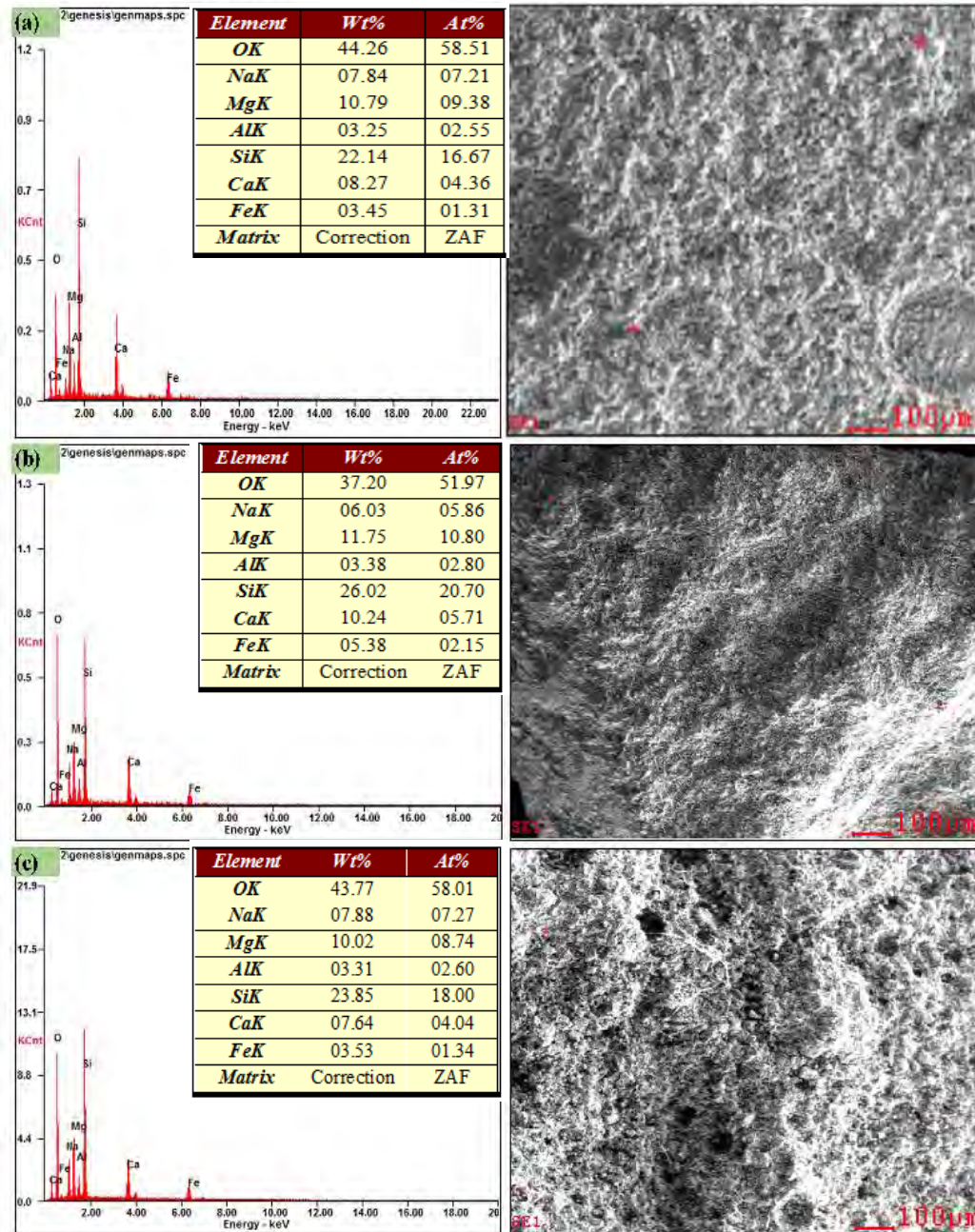
Data hasil karakterisasi dengan EDX yang terdapat pada Tabel 4.2 berupa kandungan unsur-unsur utama didalam *slag ferronickel* yang merupakan perhitungan dari tiga titik pengujian. Kandungan unsur Si rata-rata yang terkandung di dalam sampel sebesar 24,42 % berat , unsur Al sebesar 6,76 % berat. Kadar unsur Si dan Al yang dimiliki oleh *slag ferronickel* ini lebih kecil jika dibandingkan dengan kadar unsur Si dan Al pada bahan baku yang telah digunakan oleh penelitian sebelumnya. Unsur-unsur yang terdapat dalam *slag ferronickel* selanjutnya dikonversi kedalam bentuk oksidanya seperti yang terdapat pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2 Komposisi Oksida *slag ferronickel*

Komposisi Oksida	% Berat
MgO	19.50
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8.59
SiO <sub>2</sub>	43.44
CaO	20.31
FeO	8.16
Total	100,00



Karakterisasi dengan *Energy Dispersive X-Ray* (EDX) pada sampel geopolimer selain untuk mengetahui komposisi unsur juga bertujuan untuk melihat sebaran senyawa pada geopolimer yang dihasilkan dari paduan slag ferronickel dengan larutan silikat berupa paduan NaOH (7M) dan Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> (1,3M). Pengambilan hasil EDX bisa dilihat pada Gambar 4.4 berikut ini.



Gambar 4.4 Hasil Pengujian EDX Sampel Geopolimer pada Temperatur 50 °C (a), 70 °C (b) dan 90 °C (c)

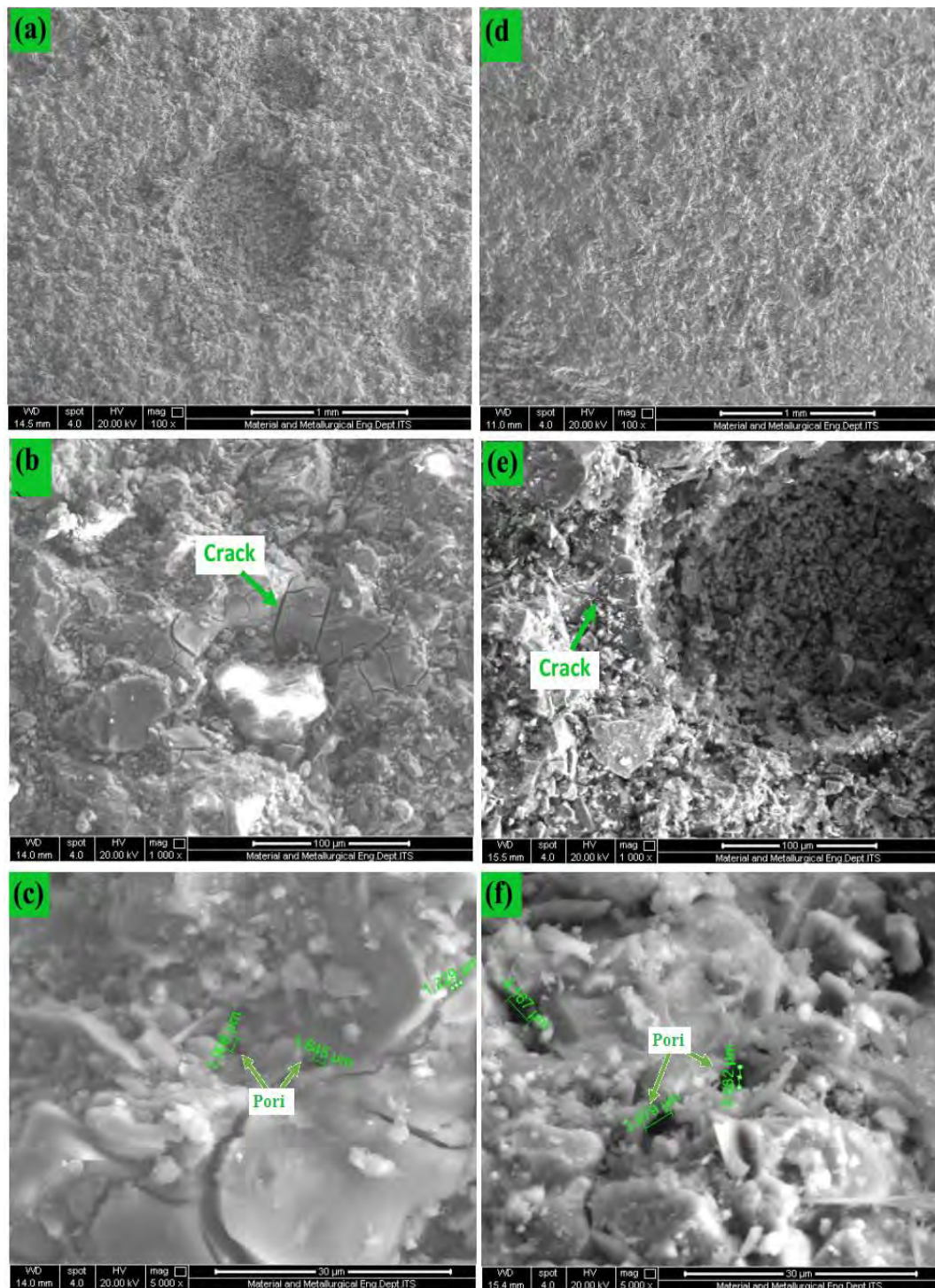


Berdasarkan hasil karakterisasi EDX diketahui bahwa dengan penambahan larutan silikat komposisi unsur dalam geopolimer menjadi bertambah utamanya unsur oksigen dan silikon serta adanya sedikit tambahan unsur natrium. Persentase komposisi unsur-unsur tersebut dalam geopolimer berbeda-beda dan sebarannya tidak merata untuk setiap variasi temperatur dan waktu *curing*. Hal ini dapat dilihat selengkapnya pada Lampiran 2 (b). Selain itu berdasarkan hasil uji EDX tersebut juga dapat dilihat adanya perubahan komposisi kandungan unsur dalam geopolimer untuk semua variasi temperatur dan waktu *curing* yaitu adanya unsur tambahan berupa natrium (Na) meskipun dengan jumlah yang relatif kecil. Jika dilihat dari hasil karakterisasi sebelumnya baik XRD maupun FTIR keberadaan unsur ini tidak merubah fasa dari geopolimer, hal ini menunjukkan bahwa unsur (Na) dalam geopolimer hanyalah sebagai ion penyeimbang sehingga tidak merubah struktur geopolimer. Secara umum, peningkatan kadar unsur Si pada geopolimer terbesar terdapat pada temperatur *curing* 70 °C dan akan dilihat pengaruhnya terhadap sifat sifat fisik maupun mekanik geopolimer melalui uji serapan air, densitas dan kuat tekan yang akan dibahas pada sub bab berikutnya.

#### **4.5 Hasil Karakterisasi *Scanning Electron Microscope* (SEM)**

Pengujian menggunakan metode *Scanning Electron Microscope* (SEM) dilakukan untuk karakterisasi morfologi geopolimer yang dihasilkan melalui proses geopolimerisasi dengan beberapa variasi temperatur dan waktu *curing*. Hasil uji SEM meliputi morfologi geopolimer tampak atas (*surface*) dengan perbesaran 100x, 1000x dan 5000x, dan pengukuran pori yang terbentuk akibat proses *curing* yang telah dilakukan.

Salah satu perubahan pada morfologi permukaan dan pori yang terbentuk pada produk geopolimer seiring dengan meningkatnya temperatur dapat dilihat pada temperatur 50 °C dengan waktu *curing* 12 dan 24 jam yang selengkapnya dapat dilihat pada Gambar 4.5.



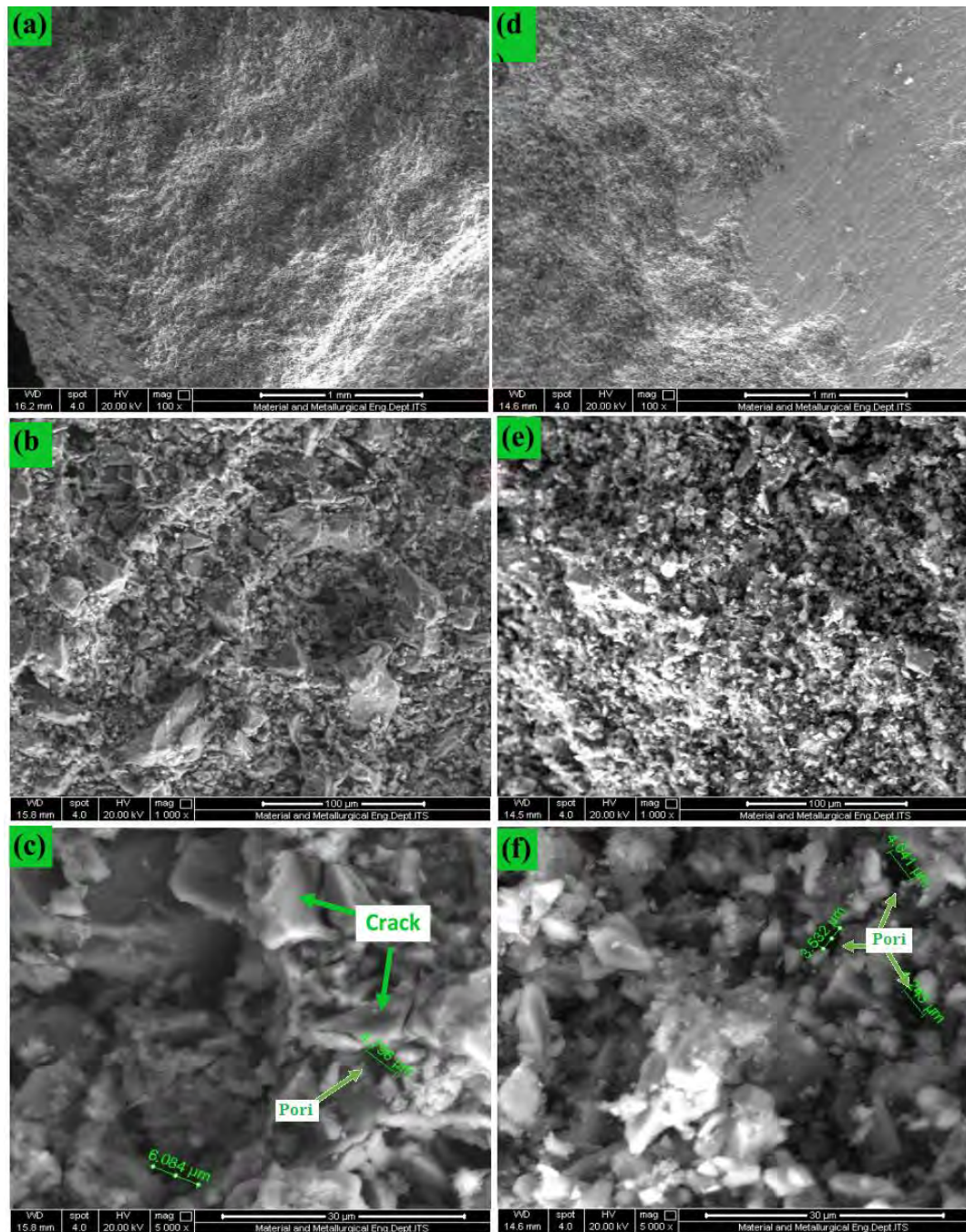
Gambar 4.5 Hasil SEM Sampel Geopolimer pada Temperatur 50 °C dengan Waktu *Curing* 12 jam pada perbesaran 100x (a), 1000x (b) dan 5000x (c) dan Waktu *Curing* 24 jam pada perbesaran 100x (d), 1000x (e) dan 5000x (f)

Berdasarkan hasil tersebut dapat dilihat bahwa pada geopolimer pada temperatur *curing* 50 °C baik dengan waktu *curing* selama 12 maupun 24 jam memiliki permukaan yang tidak merata, dimana terdapat ruang-ruang kosong/ *void* pada permukaan keduanya, seperti yang tampak pada Gambar 4.5 (a) dan (d). Keberadaan *void* ini dapat disebabkan oleh adanya udara yang masih terperangkap di dalam sampel yang terjadi pada saat proses pencetakan geopolimer yang masih berbentuk pasta yang sangat kental. Selain adanya *void* yang terbentuk pada temperatur ini juga dapat dilihat adanya retakan yang terdapat pada kedua geopolimer meskipun retakan pada geopolimer dengan waktu *curing* 12 jam lebih banyak jika dibandingkan dengan geopolimer pada waktu *curing* 24 jam yang dapat dilihat pada Gambar 4.5 (b) dan (e). Retakan yang terbentuk pada geopolimer ini menandakan bahwa proses polimerisasi atau polikondensasi tidak berlangsung dengan baik sehingga ikatan/konektivitas jaringan gel terputus atau proses transformasi partikel slag menjadi jaringan gel (amorf) tidak terjadi secara sempurna. Hal ini menyebabkan munculnya kumpulan-kumpulan partikel *slag ferronickel* tidak terlarut yang terpisah dengan larutan silikat gel sehingga menghasilkan permukaan yang retak. Pada daerah ini nantinya akan menjadi daerah yang rentan terhadap kegagalan saat uji tekan geopolimer atau dengan kata lain adanya retakan yang terbentuk maka dapat menurunkan kekuatan tekan geopolimer (Maragkos dkk, 2008).

Selain melihat morfologi permukaan geopolimer uji SEM juga dilakukan untuk melihat kemungkinan adanya pori yang terbentuk selama *curing* dalam proses geopolimerisasi seperti yang tampak pada Gambar 4.5 (c) dan (f). Dari hasil SEM yang telah dilakukan ditemukan bahwa baik geopolimer dengan waktu *curing* 1 dan 24 jam pada temperatur 50 °C keduanya memiliki pori di dalamnya. Meski demikian geopolimer yang di-*curing* pada temperatur 50 °C selama 12 jam menghasilkan pori dengan ukuran diameter yang lebih kecil (1,229 – 1,906  $\mu\text{m}$ ) jika dibandingkan dengan geopolimer pada waktu *curing* 24 jam yang memiliki ukuran diameter pori (2,682 – 4,167  $\mu\text{m}$ ). Keberadaan pori dan besarnya ukuran pori yang terbentuk akan berkontribusi pada sifat fisik – mekanik geopolimer yang akan dibahas pada sub-bab berikutnya.



Selanjutnya pengamatan SEM dilakukan pada geopolimer dengan temperatur *curing* 70 °C dan waktu *curing* 12 dan 24 jam. Dari hasil yang diperoleh adanya perbedaan morfologi permukaan yang dibentuk oleh geopolimer pada temperatur *curing* 70 °C. Hasil SEM selengkapnya dapat dilihat pada Gambar 4.6.

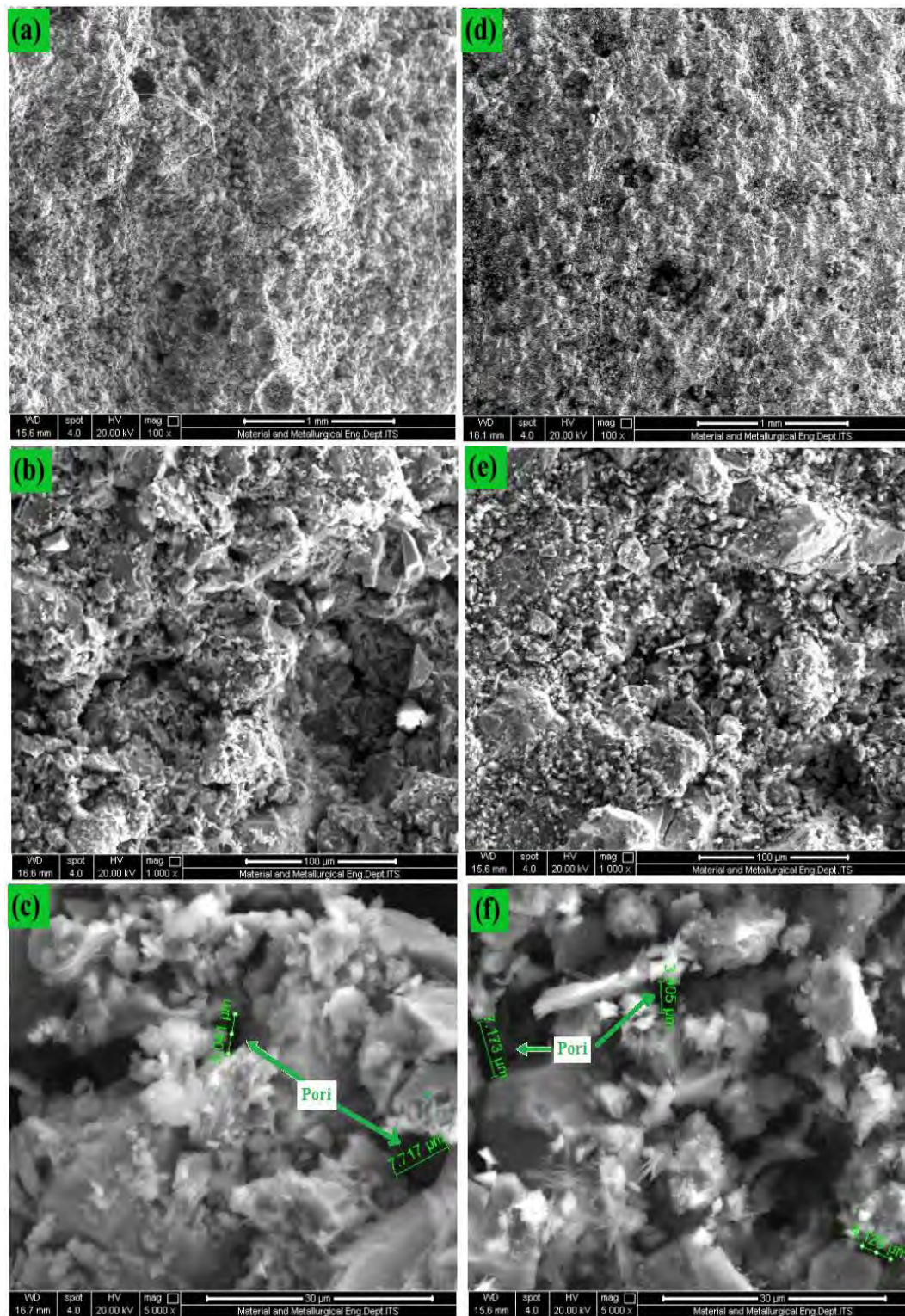


Gambar 4.6 Hasil SEM Sampel Geopolimer pada Temperatur 70 °C dengan Waktu *Curing* 12 jam pada perbesaran (a), 100x, (b) 1000x dan (c) 5000x dan Waktu *Curing* 24 jam pada perbesaran 100x (d), 1000x (e) dan 5000x (f)

Hasil SEM geopolimer pada temperatur 70 °C dengan waktu *curing* selama 12 dan 24 jam menampilkan morfologi permukaan yang lebih merata jika dibandingkan dengan geopolimer pada temperatur 50 °C. Berdasarkan hasil tersebut dapat dilihat bahwa pada perlakuan ini tidak ditemukan lagi adanya *void* yang terbentuk seperti yang dapat dilihat pada Gambar 4.6 (a) dan (d). Hal ini karena pada temperatur ini masih ada udara yang masih terperangkap dalam geopolimer dapat dibebaskan atau bereaksi dengan baik selama proses polikondensasi. Selain itu retakan mikro yang semula muncul pada temperatur *curing* 50 °C tidak lagi ditemukan pada temperatur *curing* 70 °C, dapat dilihat pada Gambar 4.6 (b) dan (e). Hal ini menunjukkan bahwa proses polikondensasi dapat berlangsung dengan optimal sehingga dapat berikatan dengan baik dengan larutan silikat dan membentuk gel aluminosilikat semakin banyak. Dari gambar juga dapat dilihat khususnya pada Gambar 4.6 (e) yaitu geopolimer dengan temperatur 70 °C dengan waktu *curing* 24 jam tampak memiliki kumpulan-kumpulan matriks amorf dengan bentuk yang lebih merata dibandingkan dengan pada waktu *curing* 12 jam. Selain morfologi permukaan yang berbeda geopolimer pada temperatur ini juga menghasilkan pori dengan ukuran yang lebih besar jika dibandingkan dengan temperatur 50 °C. Hal ini dapat dilihat pada Gambar 4.6 (e) dan (f). Pada temperatur ini pori yang dihasilkan oleh geopolimer berbasis *slag ferronickel* yang dihasilkan rata-rata dengan ukuran  $\pm 4 \mu\text{m}$ .

Pengamatan SEM selanjutnya dilakukan pada geopolimer dengan temperatur *curing* 90 °C dan waktu *curing* 12 dan 24 jam. Dari hasil SEM yang diperoleh bahwa geopolimer pada temperatur ini memiliki morfologi yang memiliki banyak pori sehingga menghasilkan permukaan yang tidak rata. Jika dibandingkan dengan hasil SEM sebelumnya pada temperatur 90 °C geopolimer selain memiliki pori yang hampir sama dengan pori pada temperatur 70 °C juga memiliki pori yang banyak terdapat ukuran pori yang lebih besar dengan ukuran  $\pm 7 \mu\text{m}$ . Diantara ketiganya geopolimer pada temperatur ini dapat dikatakan memiliki porositas yang tinggi sehingga ada kemungkinan juga akan memiliki serapan air yang tinggi dan porositas ini juga diperkirakan akan mempengaruhi kekuatan tekan dari geopolimer. Hasil SEM geopolimer pada temperatur 90 °C dengan waktu *curing* 12 dan 24 jam selengkapanya dapat dilihat pada Gambar 4.7.

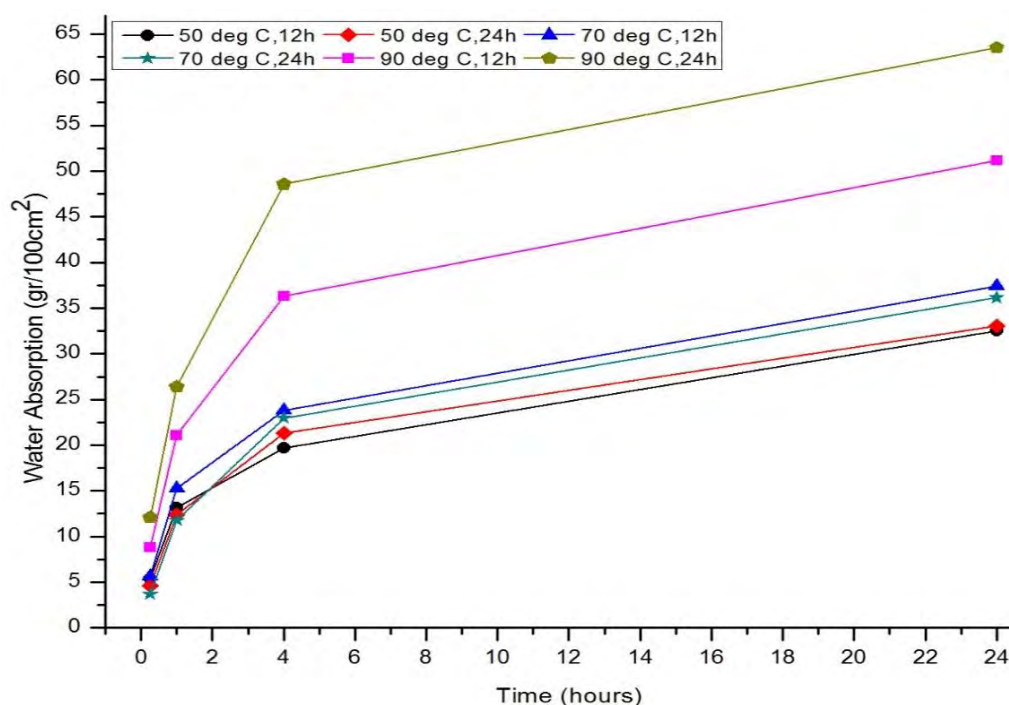




Gambar 4.7 Hasil SEM Sampel Geopolimer pada Temperatur 90 °C dengan Waktu *Curing* 12 jam pada perbesaran (a), 100x, (b) 1000x dan (c) 5000x dan Waktu *Curing* 24 jam pada perbesaran 100x (d), 1000x (e) dan 5000x (f)

#### 4.6 Hasil Pengujian Serapan Air (*Water Absorption*)

Penyerapan air merupakan salah satu parameter penting yang harus diuji dari semen baik semen biasa maupun semen geopolimer, hal ini perlu dilakukan karena melalui uji penyerapan air permeabilitas dan tingkat reaksi dari produk geopolimer seperti mortar atau beton dapat diketahui sehingga dapat membantu dalam proses perencanaan dan pengaplikasian semen bagi bangunan. Pada penelitian ini telah dilakukan pengujian serapan air geopolimer berbasis *slag ferronickel* dengan beberapa variasi temperatur dan waktu *curing* berdasarkan ASTM C 1403. Hubungan peningkatan temperatur dan waktu *curing* terhadap nilai serapan air dari geopolimer selengkapny dapat dilihat pada Gambar 4.8.



Gambar 4.8 Grafik Serapan Air Semen Geopolimer dengan Variasi Temperatur dan Waktu *Curing*

Berdasarkan Gambar 4.8 diatas dapat dilihat bahwa secara umum nilai serapan air geopolimer dengan variasi temperatur dan waktu *curing* menunjukkan bahwa dengan meningkatnya temperatur dan waktu *curing* yang digunakan maka nilai serapan air akan semakin tinggi. Peningkatan terbesar terjadi pada temperatur *curing* 90 °C dengan kenaikan sebesar 5-6%, sementara pada temperatur *curing* 50 °C dan 70 °C nilai serapan air hanya sebesar 3%. Dari data pengujian yang telah

dilakukan, nilai rata-rata serapan air geopolimer dimulai dari nilai terbesar yaitu pada temperatur 90 °C dengan waktu *curing* 24 jam sebesar 12,1 – 63,5 g/100cm<sup>2</sup>, temperatur 90 °C dengan waktu *curing* 12 jam dengan nilai serapan air sebesar 8,8 – 51,2 g/100cm<sup>2</sup>, selanjutnya pada temperatur 70 °C dengan waktu *curing* 24 dan 12 jam memiliki nilai serapan air masing-masing 3,7 – 36,1 g/100cm<sup>2</sup> dan terakhir pada temperatur 50 °C nilai serapan airnya sebesar 4,6 – 33,2 g/100cm<sup>2</sup> pada waktu *curing* 24 jam dan 5,4 – 32,5 g/100cm<sup>2</sup> pada waktu *curing* 12 jam. Jika ditinjau dari syarat yang ditetapkan oleh ASTM C 216-10, maka geopolimer berbasis slag ferronickel yang memiliki rentang presentase serapan air sebesar 3-6 % dapat diaplikasikan sebagai *facing brick* dan juga untuk aplikasi *lead bearing* (ASTM C 90-09).

Nilai serapan air dapat dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti tingkat kandungan air awal yang terdapat dalam sampel juga dipengaruhi oleh keberadaan pori dalam sampel. Menurut (Lamond, J.F dan Pielert, JH, 2006) serapan air merupakan fungsi dari porositas dan ukuran pori, sehingga semakin banyak jumlah pori dan semakin besar ukuran pori yang terbentuk maka nilai serapan air juga akan semakin besar demikian pula sebaliknya. Jika melihat hasil yang diperoleh pada pengamatan SEM yang telah dibahas pada sub bab sebelumnya, maka meningkatnya nilai serapan air pada geopolimer dengan temperatur *curing* yang lebih tinggi dan waktu *curing* yang lebih lama disebabkan oleh keberadaan pori dengan ukuran yang lebih besar dalam geopolimer sehingga kapasitas untuk menyerap air juga semakin banyak. Sedangkan pada temperatur dan waktu *curing* yang lebih rendah jumlah pori yang terbentuk lebih sedikit dengan ukuran relatif lebih kecil sehingga kapasitasnya dalam menyerap air lebih sedikit.

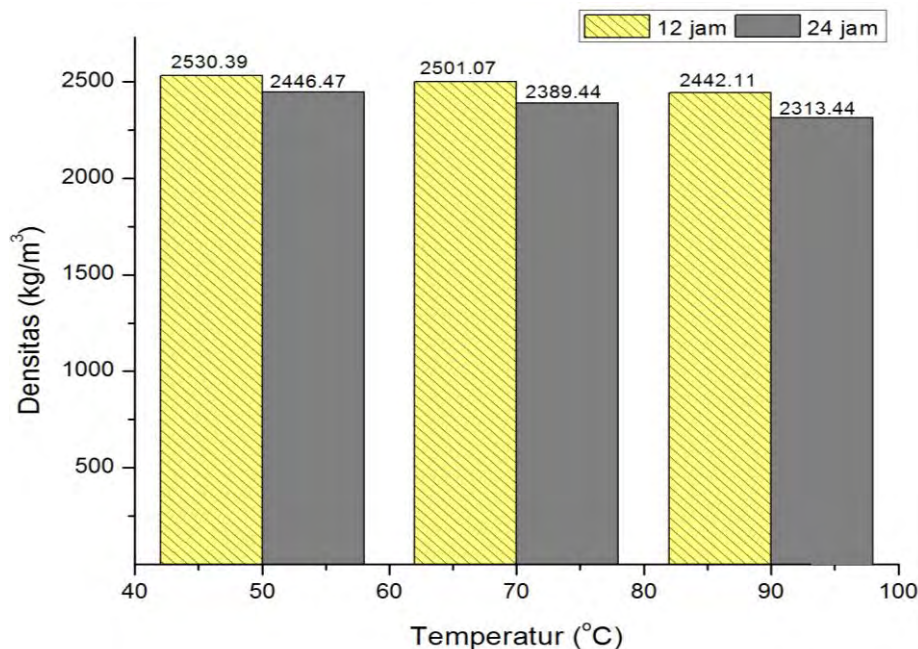
Pada temperatur 70 °C dengan waktu *curing* 12 jam nilai serapan air geopolimer lebih tinggi jika dibandingkan dengan nilai serapan air pada waktu *curing* 24 jam. Hal ini menunjukkan bahwa pada temperatur 70 °C dan waktu *curing* selama 24 jam proses geopolimerisasi berlangsung dengan baik sehingga gel geopolimer yang terbentuk lebih banyak dibandingkan dengan jumlah pori yang terbentuk. Sebagaimana yang telah dikemukakan oleh (Ken, W.P dkk, 2015) bahwa meningkatnya jumlah pori yang terbentuk dapat terjadi akibat dari terhalangnya proses geopolimerisasi sehingga pembentukan gel geopolimer berkurang.



#### 4.7 Hasil Pengujian Massa Jenis (*Density*)

Selain serapan air sifat fisik lainnya yang perlu diketahui agar memudahkan dalam perencanaan dan pengaplikasian semen bagi bangunan adalah kepadatan atau densitas. Umumnya zat atau padatan memiliki dua jenis densitas yakni densitas bulk dan densitas relatif. Pada penelitian ini pengujian densitas geopolimer dilakukan dengan dua metode pengujian yakni pengujian densitas mortar geopolimer dan densitas semen. Uji densitas mortar dilakukan untuk membandingkan nilai densitas produk mortar geopolimer berbahan dasar slag feronikel dengan mortar geopolimer berbahan dasar lain yang dilakukan mengacu pada ASTM C 905 – 01, sedangkan uji densitas semen berdasarkan ASTM C 188 untuk melihat kesesuaian nilai densitas semen geopolimer berbahan dasar *slag ferronickel* dengan nilai standar semen yang telah ditentukan.

Hasil uji densitas mortar geopolimer berbahan dasar slag ferronickel berdasarkan ASTM C 905 – 01 pada beberapa variasi temperatur dan waktu *curing* selengkapanya dapat dilihat pada Gambar 4.9.



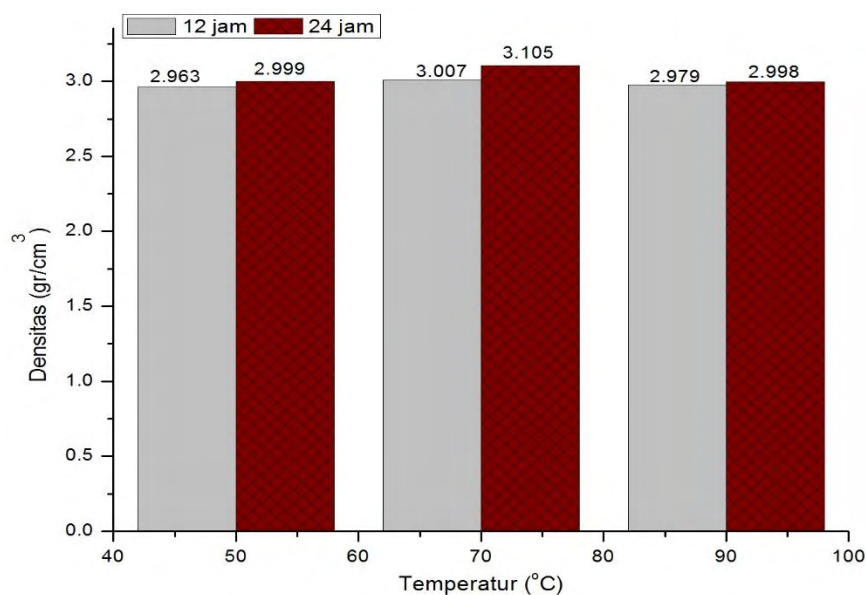
Gambar 4.9 Densitas Mortar Geopolimer Slag Ferronickel Berdasarkan ASTM 138/C 138M – 01a.

Dari hasil yang ditampilkan pada Gambar 4.9 tersebut dapat dilihat bahwa nilai densitas geopolimer semakin menurun seiring dengan peningkatan temperatur

dan waktu *curing*. Pada temperatur 50 °C dengan waktu *curing* 12 dan 24 jam nilai densitas masing-masing sebesar 2530,39 kg/m<sup>3</sup> dan 2446,47 kg/m<sup>3</sup> sementara pada temperatur 70 °C dengan waktu *curing* 12 jam nilai densitas menurun menjadi 2501,07 kg/m<sup>3</sup> dan 2389,44 kg/m<sup>3</sup> untuk waktu *curing* selama 24 jam. Sedangkan nilai densitas pada temperatur 90 °C sebesar 2442,11 kg/m<sup>3</sup> untuk waktu *curing* 12 jam dan 2313,44 kg/m<sup>3</sup> untuk waktu *curing* 24 jam.

Berdasarkan hasil yang ditampilkan pada Gambar 4.9, secara umum nilai densitas menunjukkan penurunan akibat meningkatnya temperatur dan waktu *curing*, hal ini karena dengan meningkatnya temperatur dan waktu *curing* maka kerapatan geopolimer akan berkurang akibat banyaknya pori yang terbentuk dibandingkan dengan gel aluminosilikat. Ini dapat dilihat dari hasil pengamatan SEM yang telah dikemukakan pada sub-bab sebelumnya yang menunjukkan bahwa peningkatan temperatur dan waktu *curing* menyebabkan jumlah pori yang terbentuk dengan ukuran pori yang lebih besar semakin meningkat sehingga dapat menurunkan densitas mortar geopolimer.

Selanjutnya densitas semen geopolimer dengan pengujian yang mengacu pada ASTM C 188, dimana pada pengujian ini ukuran dan jumlah pori dalam geopolimer diabaikan. Hasil yang diperoleh sebagaimana yang ditampilkan pada Gambar 4.10.



Gambar 4.10 Densitas Semen Geopolimer Slag Ferronickel Berdasarkan ASTM C-188.

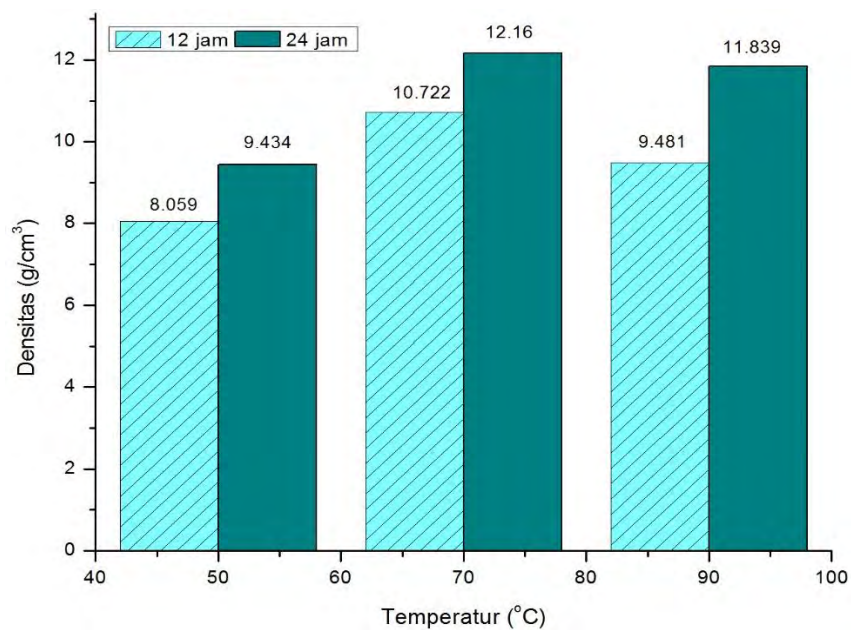
Berdasarkan grafik pada Gambar 4.10, dapat dilihat bahwa geopolimer pada temperatur 50 °C dengan waktu *curing* 12 jam diperoleh nilai densitas sebesar 2,963 g/cm<sup>3</sup> lalu meningkat pada waktu *curing* 24 jam nilai densitas sebesar 2,999 g/cm<sup>3</sup>. Selanjutnya pada temperatur 90 °C dengan nilai densitas pada waktu *curing* selama 12 jam sebesar 2,979 g/cm<sup>3</sup> dan dan 24 jam 2,998 g/cm<sup>3</sup>. Sementara semen geopolimer pada temperatur 70 °C dengan waktu *curing* 12 jam diperoleh nilai densitas sebesar 3,007 g/cm<sup>3</sup> dan pada waktu *curing* 24 jam 3,105 g/cm<sup>3</sup>. Mengacu pada nilai densitas semen yang disyaratkan yakni sekitar 3,05 - 3.25 g/cm<sup>3</sup>, maka nilai densitas pada temperatur 70 °C dengan waktu *curing* 24 jam memenuhi syarat nilai standar densitas semen. Secara umum dapat dikatakan bahwa dengan peningkatan temperatur *curing* densitas semen juga akan semakin meningkat, demikian pula dengan waktu *curing*, dimana dengan semakin lamanya waktu *curing* yang diberikan maka densitas juga akan semakin meningkat, namun hanya terjadi sampai dengan batas optimum. Mengacu pada hasil yang telah diperoleh tersebut, maka nilai densitas maksimum geopolimer berbasis *slag ferronickel* memiliki densitas maksimum dan memenuhi syarat nilai standar densitas semen pada temperatur 70 °C dengan waktu *curing* 24 jam.

Hal ini menunjukkan bahwa pada temperatur 70 °C proses geopolimerisasi terjadi secara optimal sehingga sehingga gel geopolimer yang terbentuk semakin banyak. Sebagaimana diketahui bahwa geopolimer terjadi melalui beberapa tahapan reaksi termasuk proses polikondensasi dalam rangka pembentukan jaringan aluminosilikat. Dari hasil yang diperoleh pada temperatur 70 °C dengan waktu *curing* 24 jam memiliki nilai densitas yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan nilai densitas pada temperatur 50 °C dan 90 °C. Hal ini menunjukkan bahwa pada temperatur 70 °C dengan waktu *curing* 24 jam proses polikondensasi terjadi dengan baik dan membentuk jaringan gel aluminosilikat yang lebih banyak sehingga meningkatkan nilai densitas geopolimer. Densitas geopolimer yang masih rendah pada temperatur *curing* 50 °C karena pada kondisi ini proses polikondensasi untuk pembentukan gel aluinosilikat belum optimal dan masih menyisakan konten air dalam geopolimer sehingga masih banyak partikel *slag* yang belum terikat dengan larutan aktivator akibatnya dapat memicu munculnya retakan mikro dalam geopolimer, hal ini dapat dilihat pada hasil pengamatan SEM. Sementara penurunan

nilai densitas geopolimer pada temperatur 90 °C disebabkan oleh proses penguapan dalam matriks geopolimer lebih cepat terjadi akibat tingginya temperatur dibandingkan dengan proses polikondensasi sehingga proses geopolimerisasi tidak maksimum dan sebaliknya porositas yang terjadi semakin tinggi (Temuujin dkk, 2009).

#### 4.8 Hasil Pengujian Kuat Tekan (*Compressive Strength*)

Pada penelitian ini kuat tekan semen geopolimer yang diukur hanya pada semen setelah *curing* selama 28 hari (usia 28 hari). Hal ini dilakukan karena berdasarkan referensi yang ada kuat tekan semen geopolimer memiliki nilai optimum pada usia 28 hari. Selain itu pada usia 28 hari diperkirakan proses kondensasi pada semen geopolimer sudah terjadi secara sempurna dibandingkan dengan usia semen sebelum 28 hari. Adapun hasilnya selengkapnya dapat dilihat pada Gambar 4.11.



Gambar 4.11 Grafik Kuat Tekan Geopolimer pada Beberapa Variasi Temperatur dan Waktu *Curing*

Dari hasil yang disajikan pada Gambar 4.51 tersebut dapat dilihat bahwa nilai kuat tekan geopolimer pada temperatur 50 °C dengan waktu *curing* 12 dan 24 jam kuat tekan geopolimer masing-masing 8,059 MPa dan 10,722 MPa, selanjutnya

pada temperatur 70 °C dengan waktu *curing* 12 jam kuat tekan diperoleh sebesar 9,434 MPa dan sedangkan pada waktu *curing* 24 jam kuat tekan menjadi sebesar 12,16 MPa dan pada temperatur 90 °C dengan waktu *curing* 12 dan 24 jam kuat tekan geopolimer masing-masing sebesar 9,481 MPa dan 11,839 MPa. Jika mengacu pada ASTM C 90-09, maka geopolimer yang memenuhi standar kuat tekan yang dapat dimanfaatkan yakni geopolimer yang dihasilkan dari temperatur 70 °C dengan waktu *curing* 24 jam khususnya untuk aplikasi *lead bearing*.

Berdasarkan hasil tersebut dapat dilihat bahwa waktu curing memberikan pengaruh yang cukup signifikan terhadap kuat tekan geopolimer, dimana pada waktu *curing* 24 jam kuat tekan geopolimer yang dihasilkan lebih besar jika dibandingkan dengan kuat tekan geopolimer pada waktu *curing* 12 jam. Hal ini menunjukkan bahwa semakin lama waktu *curing* yang diberikan maka kuat tekan juga akan semakin meningkat. Sedangkan pada variasi temperatur dapat dilihat bahwa pada temperatur 70 °C kuat tekan maksimum jika dibandingkan dengan temperatur *curing* lainnya. Jika mengacu pada hasil karakterisasi mikroskopis baik XRD maupun FTIR yang menunjukkan bahwa geopolimer pada temperatur 70 °C dengan waktu *curing* 24 jam memiliki kandungan senyawa aluminosilikat yang lebih banyak dibandingkan dengan geopolimer pada kondisi lain, demikian pula dari hasil pengamatan SEM dapat dilihat bahwa pada kondisi ini permukaan geopolimer tidak memiliki retakan mikro seperti pada temperatur *curing* 50 °C dan diameter pori yang dihasilkan lebih kecil dibanding dengan diameter pori pada temperatur *curing* 90 °C sehingga menghasilkan kuat tekan yang maksimum. Dengan demikian dapat dikatakan bahwa pada temperatur 70 °C dengan waktu *curing* 24 jam proses polikondensasi dalam geopolimer berlangsung dengan baik/semurna sehingga menghasilkan gel aluminosilikat dengan jumlah yang lebih banyak dengan distribusi yang lebih merata dibandingkan pada temperatur lainnya.

Sebagaimana yang telah dikemukakan oleh Ghosh, K dalam (Karakoc dkk, 2014), bahwa kekuatan tekan geopolimer tergantung pada kuantitas gel aluminosilikat yang terbentuk selama proses geopolimerisasi. Semakin banyak jumlah gel aluminosilikat yang terbentuk maka kekuatan tekan geopolimer juga akan semakin meningkat. Pembentukan gel aluminosilikat dipengaruhi oleh proses polikondensasi dalam geopolimerisasi, dimana gel aluminosilikat yang terbentuk

akan meningkat jika semua kandungan air dalam pasta geopolimer dapat dilepaskan dalam proses polikondensasi untuk membentuk gel aluminosilikat. Rendahnya kuat tekan pada temperatur 50 °C karena pada kondisi ini proses pembubaran species alumina dan silica berlangsung dengan waktu yang lebih lama sehingga hanya mampu menghasilkan monomer alumina dan silikat dalam jumlah yang terbatas, akibatnya gel aluminosilikat yang dihasilkan juga lebih sedikit dibandingkan dengan jumlah gel aluminosilikat pada temperatur yang lebih tinggi.

Jika meninjau hasil pengamatan SEM, pada geopolimer dengan temperatur 50 °C dengan waktu *curing* 12 maupun 24 jam tampak memiliki retakan mikro yang lebih banyak dibanding dengan geopolimer pada temperatur dan waktu *curing* yang lebih tinggi. Menurut Sukmak, P dalam (Ken dkk, 2015) pengendapan species Si dan Al terlarut pada tahap awal sebelum memulai proses polikondensasi, mengakibatkan pembentukan retak. Keberadaan retakan-mikro dalam geopolimer ini sangat mempengaruhi kekuatan tekan, dimana semakin banyak retakan-mikro yang terbentuk maka dengan sendirinya akan mengurangi kekuatan tekan geopolimer meskipun pori yang terbentuk memiliki ukuran yang lebih kecil (Maragkos dkk, 2008).

Pada temperatur *curing* 90 °C, meskipun dari hasil pengamatan SEM menunjukkan tidak ditemukannya retakan mikro dalam geopolimer pada temperatur ini, akan tetapi kuat tekan mengalami penurunan jika dibandingkan dengan geopolimer pada temperatur *curing* 70 °C. Hal ini karena pada temperatur 90 °C baik dengan waktu *curing* 12 maupun 24 jam menunjukkan keberadaan pori dengan ukuran diameter yang lebih besar dibandingkan dengan geopolimer pada temperatur *curing* yang lebih rendah, yang dapat dilihat dari hasil pengamatan SEM pada Gambar 4.7. Sebagaimana yang telah diungkapkan sebelumnya bahwa peningkatan temperatur *curing* selain mempercepat proses polikondensasi juga mampu mempercepat terbukanya atau terbentuknya pori dalam geopolimer. Ketika suhu *curing* tinggi, sampel akan mengalami kerugian besar pada tingkat kelembabannya, sementara reaksi geopolimer membutuhkan kelembaban untuk membentuk kekuatannya sehingga penurunan kekuatan akan terjadi jika kelembaban berkurang (Karakoc dkk, 2014).

Disisi lain, proses *curing* pada temperatur yang terlalu tinggi akan menyebabkan proses polikondensasi berlangsung lebih cepat sehingga pembentukan awal gel geopolymeric yang berlebihan akan menghambat pembubaran spesies silika dan alumina bereaksi. Proses *curing* yang lama pada temperatur tinggi juga dapat merusak struktur granular geopolimer, temperatur *curing* yang tinggi dapat mengakibatkan dehidrasi matriks geopolimer akibatnya gel geopolimer akan mengalami kontraksi/pengerutan sehingga menimbulkan penyusutan yang dapat menurunkan jumlah gel aluminosilikat dan berdampak pada menurunnya kekuatan tekan geopolimer. Selain itu temperatur *curing* yang terlalu tinggi juga dapat menyebabkan penguapan konten air yang tersimpan dalam pori menjadi lebih cepat dan mengakibatkan proses geopolymerisasi menjadi tidak komplit/lengkap sehingga menimbulkan porositas (Ken dkk, 2015). Dengan adanya porositas maka geopolimer akan menjadi lebih keropos sehingga kekuatan tekan menurun (Komnitsas dkk, 2008).

#### **4.9 Pengaruh Temperatur dan Waktu *Curing* terhadap Sifat Fisik-Mekanik**

Berdasarkan hasil yang telah diperoleh bahwa dengan pemberian variasi temperatur dan waktu *curing* pada proses geopolymerisasi dapat membantu dalam mempercepat proses pembentukan gel aluminosilikat untuk menjadi geopolimer melalui proses polikondensasi. Dengan meningkatnya temperatur dan waktu *curing* gel aluminosilikat yang terbentuk akan semakin meningkat sehingga partikel *slag ferronickel* dalam geopolimer dapat berikatan dengan baik yang nantinya akan berkontribusi bagi sifat fisik dan mekanik semen geopolimer. Peningkatan temperatur dan waktu *curing* juga dapat mengurangi terjadinya retakan mikro yang mampu mengurangi sifat fisik maupun sifat mekanik geopolimer. Akan tetapi disisi lain dengan adanya peningkatan temperatur dan waktu *curing* yang diberikan selama proses geopolymerisasi dapat memicu terbentuknya pori sehingga dapat menurunkan sifat fisik maupun sifat mekanik semen geopolimer.

Dari hasil analisa yang telah dilakukan dapat dilihat hubungan antara temperatur dan waktu *curing* terhadap sifat fisik berupa serapan air dan densitas maupun sifat mekanik berupa kekuatan tekan dari geopolimer berbahan dasar *slag ferronickel*. Pada sifat fisik berupa serapan air geopolimer menunjukkan bahwa

peningkatan temperatur dan waktu *curing* selain dapat mempengaruhi tingkat kelembaban geopolimer yang dihasilkan juga dapat menyebabkan peningkatan nilai serapan air dari geopolimer berbahan dasar *slag ferronickel*, dimana semakin tinggi temperatur dan waktu *curing* yang digunakan maka nilai serapan air geopolimer juga akan semakin besar. Hal ini karena pada geopolimer dengan temperatur dan waktu *curing* yang semakin besar jumlah pori dan ukuran pori yang terbentuk semakin meningkat sehingga kemampuan untuk menyerap air juga semakin besar (Lamond, J.F dan Pielert, JH, 2006).

Sifat fisik lainnya yang dipengaruhi oleh temperatur dan waktu *curing* adalah densitas (kerapatan atau kepadatan) geopolimer. Dari hasil analisa diperoleh bahwa densitas semen geopolimer maksimum pada temperatur *curing* 70 °C, hal ini menunjukkan bahwa pada temperatur ini proses polikondensasi untuk pembentukan geopolimer berupa gel aluminosilikat dapat berlangsung dengan lengkap, sehingga antara partikel *slag ferronickel* dengan larutan aktivator dapat berikatan dengan baik dan meningkatkan kerapatan geopolimer yang dihasilkan. Sementara pada densitas mortar geopolimer diperoleh bahwa dengan meningkatnya temperatur dan waktu *curing* densitas mortar akan semakin menurun. Hal ini disebabkan oleh keberadaan pori yang terbentuk akibat peningkatan temperatur (Ken dkk, 2015).

Sedangkan pada sifat mekanik berupa kekuatan tekan, geopolimer menunjukkan bahwa peningkatan temperatur membantu meningkatkan kekuatan tekan geopolimer akan tetapi pada batas tertentu peningkatan temperatur juga dapat menurunkan kekuatan tekan. Kekuatan tekan sangat dipengaruhi oleh jumlah gel aluminosilikat yang terdapat dalam geopolimer, sehingga proses geopolimerisasi harus berlangsung secara lengkap agar proses *gelasi* berlangsung dengan baik. Agar proses *gelasi* pada geopolimerisasi optimal dibutuhkan kelembaban yang baik. Pada penelitian ini, diperoleh temperatur 70 °C merupakan temperatur yang baik untuk menghasilkan kuat tekan geopolimer yang maksimum dengan waktu *curing* 24 jam. Pada temperatur *curing* yang lebih rendah (50 °C) kekuatan tekan geopolimer lebih rendah dibandingkan dengan kekuatan tekan pada temperatur diatasnya, demikian pula dengan waktu *curing* yang lebih singkat (12 jam) menghasilkan kekuatan tekan yang lebih rendah jika dibandingkan dengan waktu *curing* yang lebih tinggi (24 jam). Hal ini karena faktor kelembaban dalam

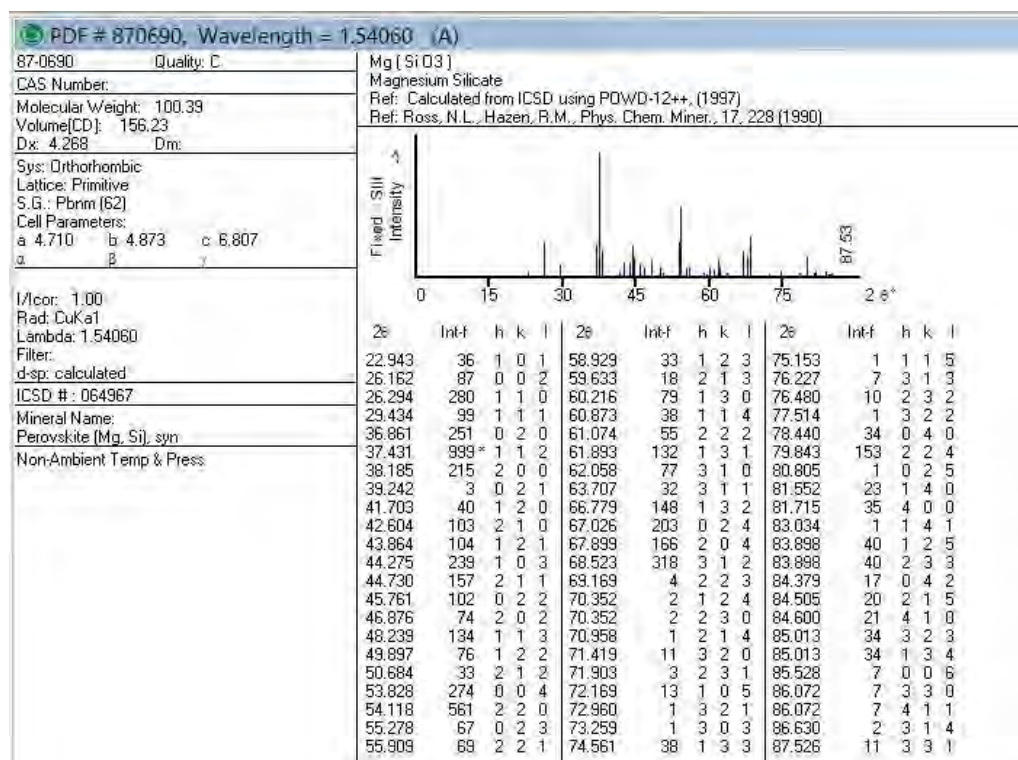
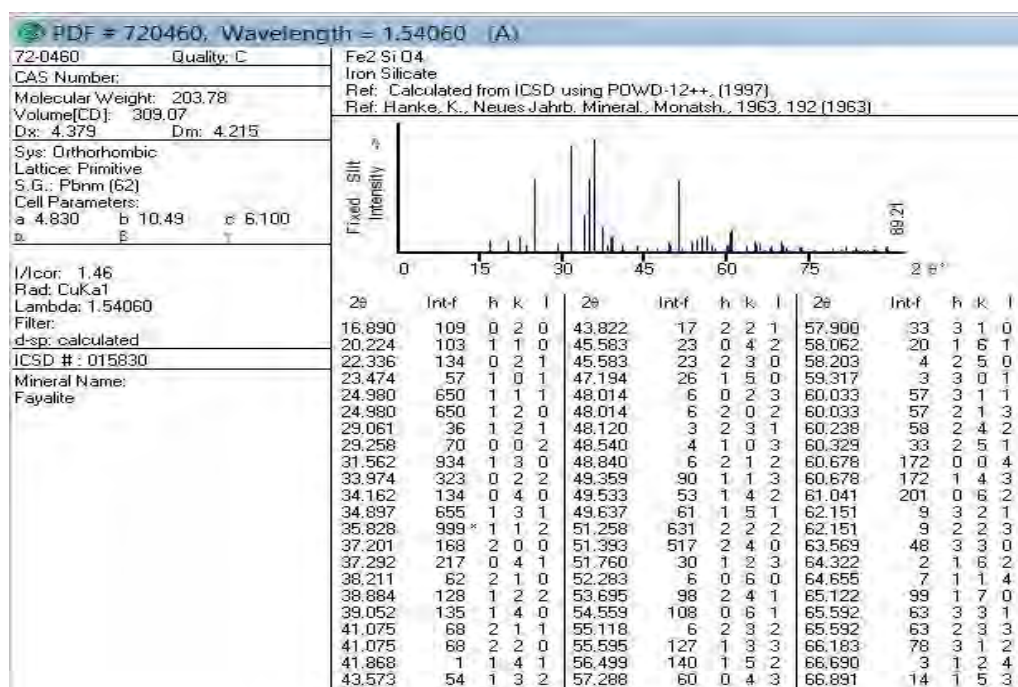


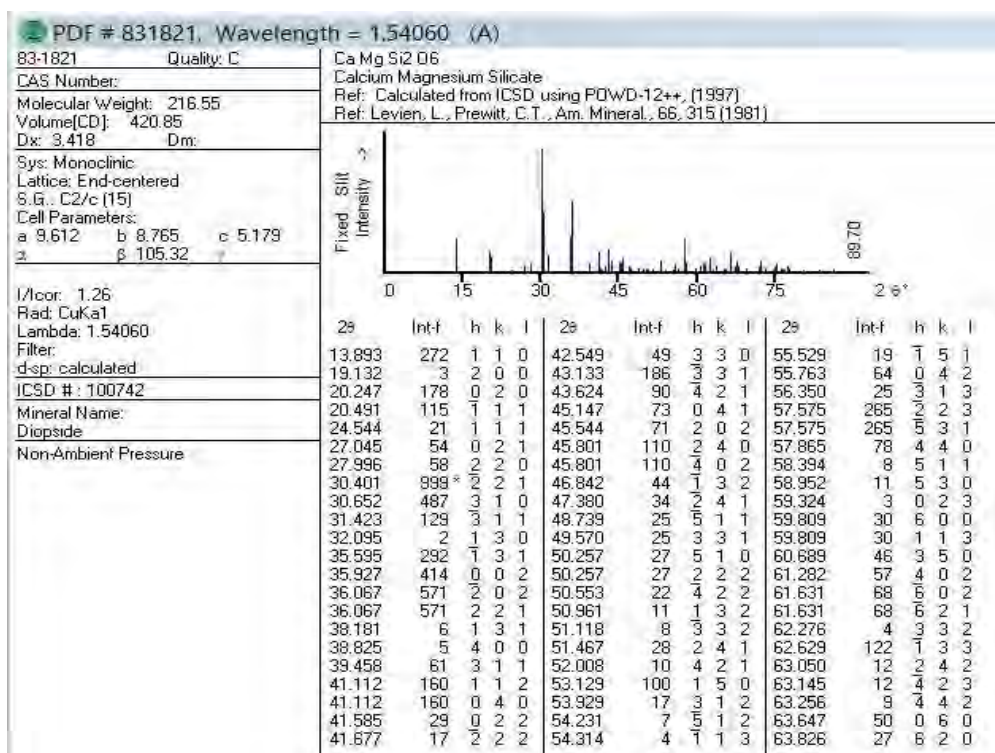
geopolimer turut mempengaruhi kekuatan tekan, dimana geopolimer dengan kadar air atau kelembaban yang rendah memiliki kekuatan tekan yang lebih tinggi (Xie,J dan Kayali, O, 2014). Akan tetapi pada temperatur yang terlalu tinggi sifat mekanik berupa kekuatan tekan geopolimer cenderung mengalami penurunan. Berdasarkan pada beberapa penelitian yang telah dilakukan sebelumnya dimana adanya peningkatan temperatur dan waktu *curing* yang terlalu tinggi memiliki kecenderungan untuk mempercepat proses penguapan kandungan air dalam geopolimer sehingga proses *gelasi* tidak dapat berlangsung secara optimal, akibatnya gel aluminosilikat yang terbentuk juga mengalami penurunan. Tingginya tingkat penguapan konten air dalam geopolimer dapat memicu terbentuknya pori dengan ukuran yang lebih besar. Banyaknya pori yang terbentuk maupun keberadaan pori dengan ukuran yang besar menyebabkan geopolimer menjadi lebih keropos dan rapuh yang menyebabkan kekuatan tekan geopolimer menurun.

# LAMPIRAN

## Lampiran 1

### a. Data JCPDS X-Ray Diffraction (XRD)





b. ICDD card #PDF no. 41-1483

Name and formula

Reference code: 00-041-1483

Mineral name: Augite, aluminian  
Compound name: Magnesium Calcium Aluminum Iron Silicate

Empirical formula:  $\text{Al}_{0.2}\text{Ca}_{0.9}\text{Fe}_{0.1}\text{MgO}_6\text{Si}_{1.8}$   
Chemical formula:  $\text{Ca}(\text{Mg}, \text{Fe}, \text{Al})(\text{Si}, \text{Al})_2\text{O}_6$

Crystallographic parameters

Crystal system: Monoclinic  
Space group: C2/c  
Space group number: 15

a (Å): 9.7428  
b (Å): 8.8942  
c (Å): 5.2723  
Alpha (°): 90.0000  
Beta (°): 106.1110  
Gamma (°): 90.0000

Calculated density (g/cm<sup>3</sup>): 3.31  
Measured density (g/cm<sup>3</sup>): 3.23  
Volume of cell (10<sup>6</sup> pm<sup>3</sup>): 438.93  
Z: 4.00

RIR: 0.56

### Subfiles and quality

Subfiles: Common Phase  
Forensic  
Inorganic  
Mineral  
Quality: Indexed (I)

### Comments

Color: Brown  
Creation Date: 6/6/1990  
Modification Date: 1/11/2011  
Additional Patterns: To replace 00-024-0202  
Analysis: Chemical analysis (wt.%): "Si O2" 47.8, "Ti O2" 1.5, "Al2 O3" 5.4, FeO 5.1, MgO 17.5, CaO 21.7, "Na2 O" 0.2: "( Ca0.85 Mg0.13 Na0.02 ) ( Mg0.83 Fe0.14 Ti0.04 ) ( Si1.75 Al0.23 ) O6". Color: Brown. Sample Source or Locality: Specimen from Paskapole, Czechoslovakia. Temperature of Data Collection: Pattern taken at 298(1) K. Unit Cell Data Source: Powder Diffraction.

### References

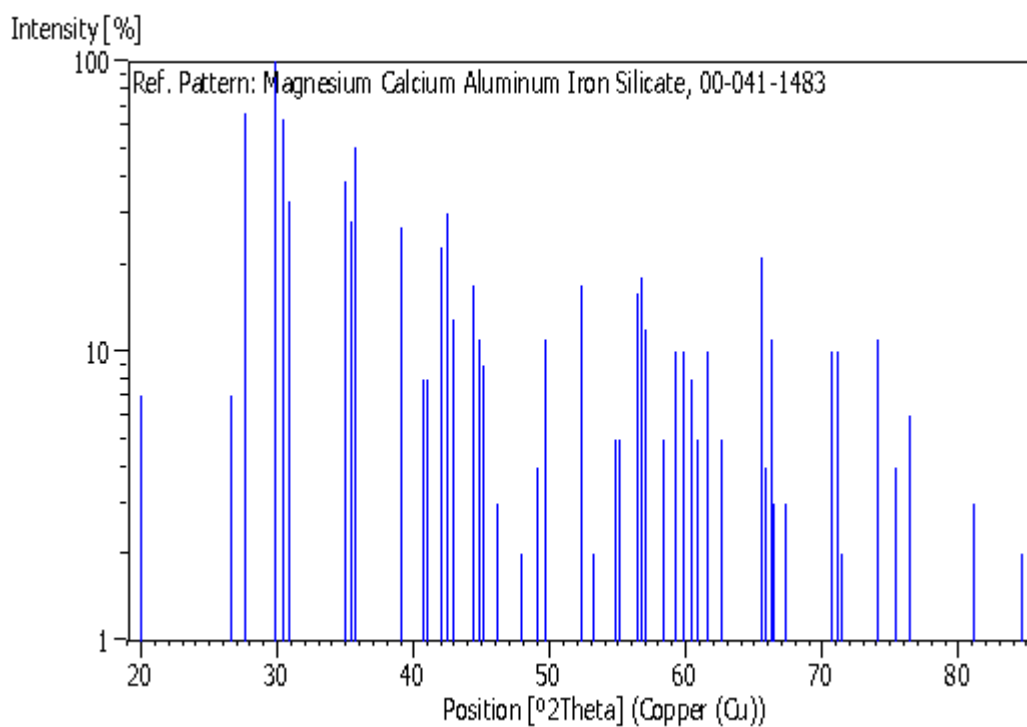
Primary reference: Sanc, I., Polytechna, Foreign Trade Corporation, Panska, Czechoslovakia., *ICDD Grant-in-Aid*, (1990)  
Unit cell: Clark, J., Appleman, D., Papike, J., *Mineral. Soc. Am., Spec. Pap.*, 2, 31, (1969)  
Optical data: Deer, W., Howie, R., Zussman, J., *Rock Forming Minerals*, 2A, 294, (1978)

### Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta[deg]	I [%]
1	0	2	0	4.44670	19.951	7.0
2	0	2	1	3.34700	26.611	7.0
3	2	2	0	3.22230	27.661	67.0
4	-2	2	1	2.99060	29.852	100.0
5	3	1	0	2.94160	30.361	63.0
6	-3	1	1	2.89600	30.851	33.0
7	-1	3	1	2.56010	35.022	39.0
8	0	0	2	2.53140	35.432	28.0
9	2	2	1	2.51080	35.732	51.0
10	3	1	1	2.29840	39.163	27.0
11	1	1	2	2.21650	40.673	8.0
12	0	2	2	2.19990	40.993	8.0
13	3	3	0	2.14930	42.003	23.0
14	-3	3	1	2.12950	42.413	30.0
15	-4	2	1	2.10680	42.892	13.0
16	0	4	1	2.03600	44.462	17.0
17	-4	0	2	2.02000	44.833	11.0
18	2	4	0	2.00730	45.132	9.0
19	-1	3	2	1.96810	46.082	3.0
20	-5	1	1	1.89520	47.964	2.0

21	3	3	1	1.85420	49.093	4.0
22	5	1	0	1.83150	49.743	11.0
23	1	5	0	1.74770	52.304	17.0
24	-5	1	2	1.72240	53.132	2.0
25	0	4	2	1.67150	54.883	5.0
26	-3	1	3	1.66590	55.083	5.0
27	-2	2	3	1.62840	56.464	16.0
28	-5	3	1	1.62290	56.672	18.0
29	4	4	0	1.61190	57.094	12.0
30	5	3	0	1.58160	58.292	5.0
31	6	0	0	1.55890	59.225	10.0
32	3	5	0	1.54450	59.833	10.0
33	-6	0	2	1.53170	60.385	8.0
34	4	0	2	1.52030	60.885	5.0
35	-1	3	3	1.50580	61.535	10.0
36	0	6	0	1.48240	62.615	5.0
37	0	6	1	1.42230	65.584	21.0
38	5	3	1	1.41840	65.787	4.0
39	-3	5	2	1.40800	66.335	11.0
40	1	5	2	1.40500	66.495	3.0
41	2	2	3	1.39010	67.302	3.0
42	-7	1	2	1.33130	70.705	10.0
43	6	2	1	1.32500	71.092	10.0
44	-5	3	3	1.31950	71.434	2.0
45	0	6	2	1.27900	74.065	11.0
46	-4	6	1	1.26010	75.367	4.0
47	3	5	2	1.24500	76.445	6.0
48	2	6	2	1.19250	80.474	1.0
49	1	5	3	1.18400	81.172	3.0
50	-1	7	2	1.14440	84.614	2.0

### Stick Pattern



## Lampiran 2

### a. Tabel Analisa Data XRD Slag Ferronickel dan Geopolimer

Sampel	Identifikasi Fasa	Pos.[°2 $\theta$ ]	FWHM Left [°2 $\theta$ ]	d-spacing [Å]
Slag Ferronickel	Forsterite	22.9114	0.0502	3.88165
		25.5104	0.1338	3.49179
		36.4754	0.0836	2.46337
	Augite	27.7911	0.2342	3.21020
		35.8208	0.0502	2.50687
	Diopside	24.5360	0.1338	3.62819
		39.2409	0.1338	2.29590
	Fayalite	30.4671	0.2342	2.93406
		40.9725	0.1004	2.20279
Geopolimer (50°, 12 jam)	Forsterite	22.8398	0.1338	3.89367
		25.4447	0.2007	3.50065
		36.5277	0.2342	2.45996
	Augite	27.8099	0.1673	3.20807
		35.7548	0.2676	2.51135
	Diopside	24.5107	0.2007	3.63189
		39.2240	0.0669	2.29686
	Fayalite	30.3899	0.1673	2.94134
		40.6537	0.2007	2.21932
Geopolimer (50°, 24 jam)	Forsterite	22.8482	0.2007	3.89224
		25.5062	0.3346	3.49234
		36.4619	0.1004	2.46425
	Augite	27.8966	0.4015	3.19830
		35.8619	0.0502	2.50409
	Diopside	24.5103	0.2007	3.63195
		39.6452	0.1338	2.27342
	Fayalite	30.0317	0.0669	2.97560
		40.8662	0.4015	2.20827
Geopolimer (70°, 12 jam)	Forsterite	22.8559	0.1004	3.89096
		25.3562	0.2007	3.51266
		36.4623	0.2342	2.46423
	Augite	27.7197	0.0836	3.21830
		35.7453	0.0502	2.51200
	Diopside	24.4632	0.2007	3.63883
		39.3673	0.6691	2.28882

	Fayalite	30.3990	0.1338	2.94048
		40.7938	0.4015	2.21202
Geopolimer (70°, 24 jam)	Forsterite	22.7936	0.1171	3.90146
		25.3691	0.3346	3.51092
		36.4376	0.0502	2.46584
	Augite	27.7173	0.1004	3.21857
		35.8010	0.1673	2.50821
	Diopside	24.4663	0.1004	3.63838
		39.5316	0.1338	2.27969
	Fayalite	30.8585	0.1338	2.89773
		40.9250	0.1338	2.20523
Geopolimer (90°, 12 jam)	Forsterite	22.8783	0.0502	3.88719
		25.5151	0.2676	3.49116
		36.4937	0.2676	2.46218
	Augite	27.7568	0.2007	3.21408
		35.7087	0.1171	2.51448
	Diopside	24.5325	0.2007	3.62871
		39.3591	0.0502	2.28929
	Fayalite	30.9894	0.2676	2.88579
		40.7141	0.3346	2.21617
Geopolimer (90°, 24jam)	Forsterite	22.9380	0.1004	3.87722
		25.5879	0.1338	3.48138
		36.5290	0.0502	2.45988
	Augite	26.8416	0.2007	3.32156
		35.8890	0.0836	2.50227
	Diopside	24.5684	0.2676	3.62349
		39.6482	0.1338	2.27326
	Fayalite	30.5253	0.1171	2.92860
		40.7987	0.4015	2.21177

**b. Komposisi Unsur yang Terkandung dalam Geopolimer pada berbagai variasi Temperatur dan Waktu *Curing*.**

Temperatur & Waktu <i>curing</i>	Titik I			Titik II		
	Element	Wt %	At%	Element	Wt %	At%
70 °C, 12 jam	O K	37.20	51.97	O K	40.06	54.91
	Na K	06.03	05.86	Na K	03.91	03.73
	Mg K	11.75	10.80	Mg K	12.06	10.88
	Al K	03.38	02.80	Al K	03.68	02.99
	Si K	26.02	20.70	Si K	26.48	20.68
	Ca K	10.24	05.71	Ca K	09.05	04.95
	Fe K	05.38	02.15	Fe K	04.76	01.87
70 °C, 24 jam	O K	38.29	53.57	O K	37.20	51.97
	Na K	02.06	02.01	Na K	06.03	05.86
	Mg K	12.26	11.29	Mg K	11.75	10.80
	Al K	03.89	03.23	Al K	03.38	02.80
	Si K	27.31	21.76	Si K	26.02	20.70
	Ca K	10.47	05.85	Ca K	10.24	05.71
	Fe K	05.73	02.30	Fe K	05.38	02.15
90 °C, 12 jam	O K	43.77	58.01	O K	40.06	54.91
	Na K	07.88	07.27	Na K	03.91	03.73
	Mg K	10.02	08.74	Mg K	12.06	10.88
	Al K	03.31	02.60	Al K	03.68	02.99
	Si K	23.85	18.00	Si K	26.48	20.68
	Ca K	07.64	04.04	Ca K	09.05	04.95
	Fe K	03.53	01.34	Fe K	04.76	01.87
90 °C, 24 jam	O K	43.72	58.10	O K	44.26	58.51
	Na K	09.28	08.58	Na K	07.84	07.21
	Mg K	09.57	08.37	Mg K	10.79	09.38
	Al K	03.09	02.44	Al K	03.25	02.55
	Si K	21.82	16.52	Si K	22.14	16.67
	Ca K	08.22	04.36	Ca K	08.27	04.36
	Fe K	04.30	01.64	Fe K	03.45	01.31



**c. Tabel Hasil Perhitungan Nilai Serapan Air Semen Geopolimer pada beberapa Variasi Temperatur dan Waktu *Curing***

Kode Sampel	Massa Sampel (g) setelah pengujian adsorpsi pada waktu (T,jam)					Luasan sampel (mm <sup>2</sup> )	Adsorpsi air (g/100cm <sup>2</sup> )			
	T <sub>0</sub>	T <sub>0,25</sub>	T <sub>1</sub>	T <sub>4</sub>	T <sub>24</sub>		A <sub>0,25</sub>	A <sub>1</sub>	A <sub>4</sub>	A <sub>24</sub>
P <sub>1</sub> , P <sub>2</sub> , P <sub>3</sub>	307,3	308,8	310,9	312,6	316,1	2711,3	5,4	13,1	19,7	32,5
P <sub>4</sub> , P <sub>5</sub> , P <sub>6</sub>	303,2	304,4	306,5	308,9	312,0	2667,5	4,6	12,4	21,3	33,1
Q <sub>1</sub> , Q <sub>2</sub> , Q <sub>3</sub>	295,6	297,1	299,7	302,0	305,6	2658,9	5,7	15,3	23,8	37,4
Q <sub>4</sub> , Q <sub>5</sub> , Q <sub>6</sub>	292,4	293,4	295,5	298,4	301,9	2610,2	3,7	11,8	23,0	36,1
R <sub>1</sub> , R <sub>2</sub> , R <sub>3</sub>	295,7	298,2	301,6	305,9	310,1	2822,4	8,8	21,1	36,3	51,2
R <sub>4</sub> , R <sub>5</sub> , R <sub>6</sub>	286,2	289,4	293,3	299,2	303,2	2687,3	12,1	26,4	48,6	63,5

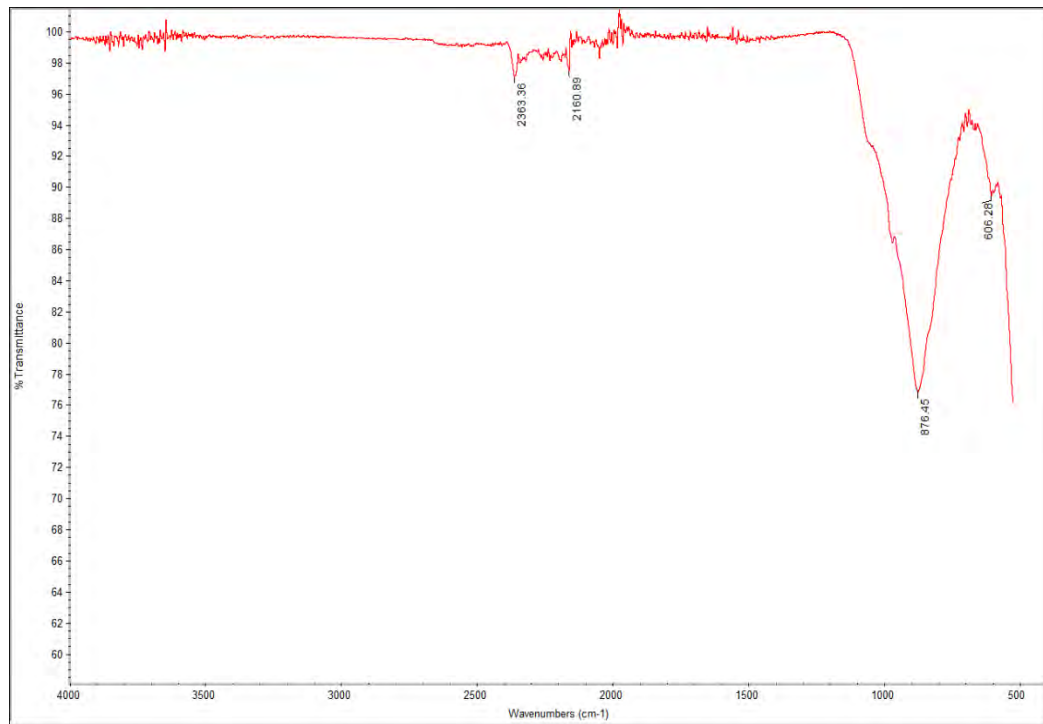
**d. Tabel Syarat Nilai Serapan Air dan Kuat Tekan *Facing Brick* dan *Loadbearing Concrete* berdasarkan ASTM C 90-09 dan ASTM C 216-10**

ASTM C 90-09 <i>Loadbearing Concrete Masonary</i>	Serapan Air Maksimum, lb/ft <sup>3</sup> (kg/m <sup>3</sup> )		Kekuatan Tekan Maksimum, lb/ft <sup>2</sup> (MPa)	
	Rata-rata 3 unit	Individu	Rata-rata 3 unit	Individu
Light weight	18 (280)	20 (320)	1900 (13,1)	1700 (11,7)
Medium weight	15 (240)	17 (272)	1900 (13,1)	1700 (11,7)
Normal weight	13 (208)	15 (240)	1900 (13,1)	1700 (11,7)
ASTM C 216-10 <i>Facing Brick</i>	Serapan Air Maksimum, 5 jam dipanaskan (%)		Kekuatan Tekan Maksimum, psi (MPa)	
	Rata-rata 5 unit	Individu	Rata-rata 5 unit	Individu
Grade SW	17,0	20,0	3000 (20,7)	2500 (17,2)
Grade MW	22,0	25,0	2500 (17,2)	2200 (15,2)

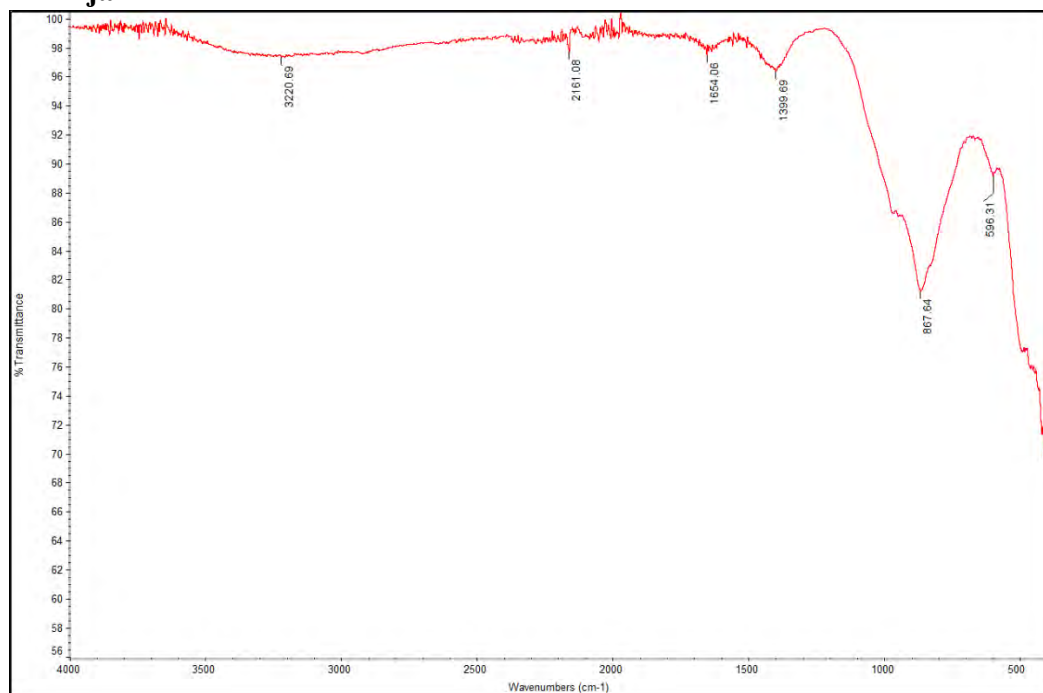
**Ket : SW = Severe Weathering; MW = Moderate Weathering**

### Lampiran 3s

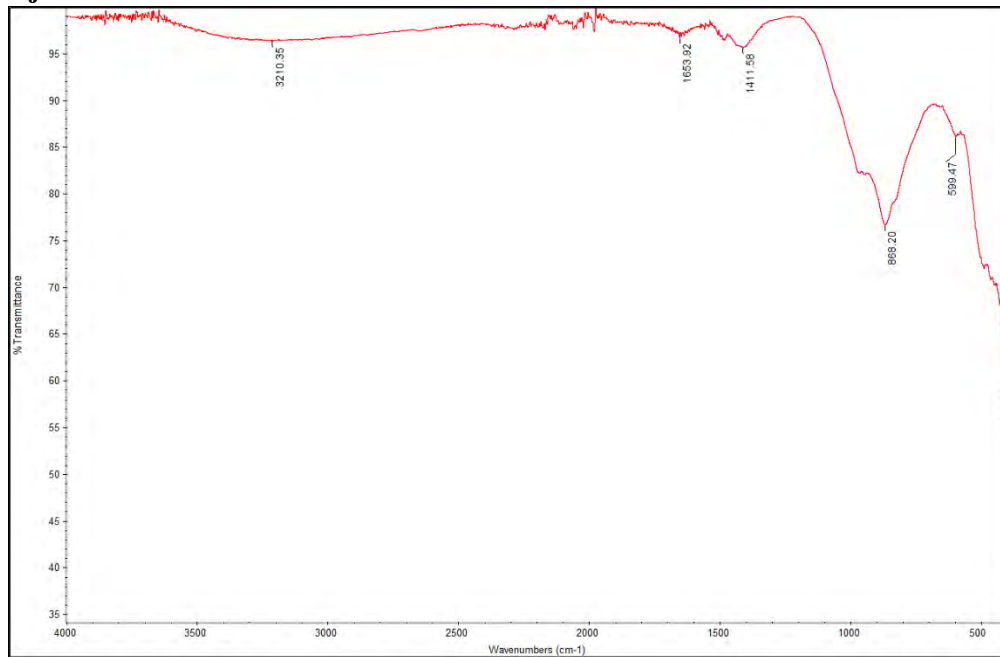
#### a. Grafik FTIR Slag Ferronickel



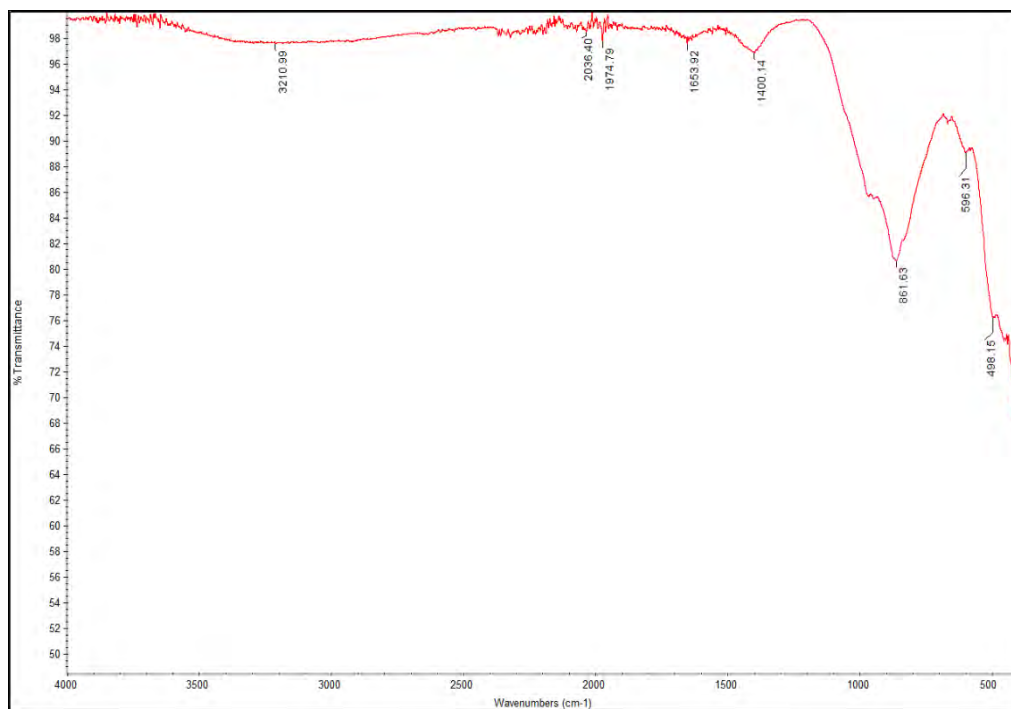
#### b. Grafik FTIR Geopolimer pada Temperatur 50 °C dengan Waktu Curing 12 jam



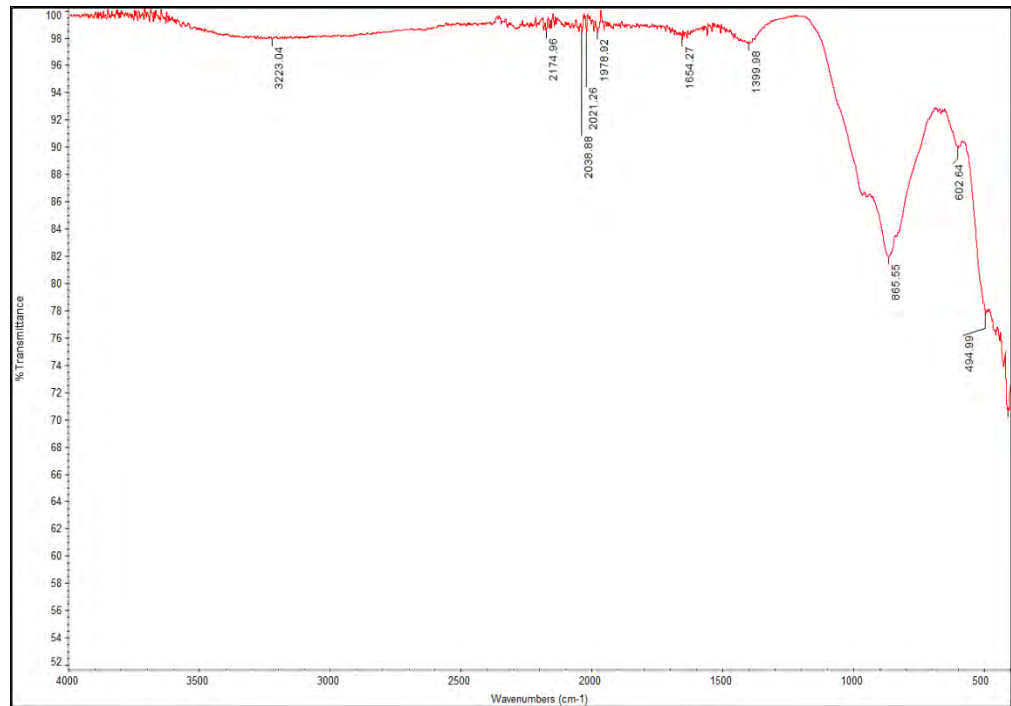
c. **Grafik FTIR Geopolimer pada Temperatur 50 °C dengan Waktu Curing 24 jam**



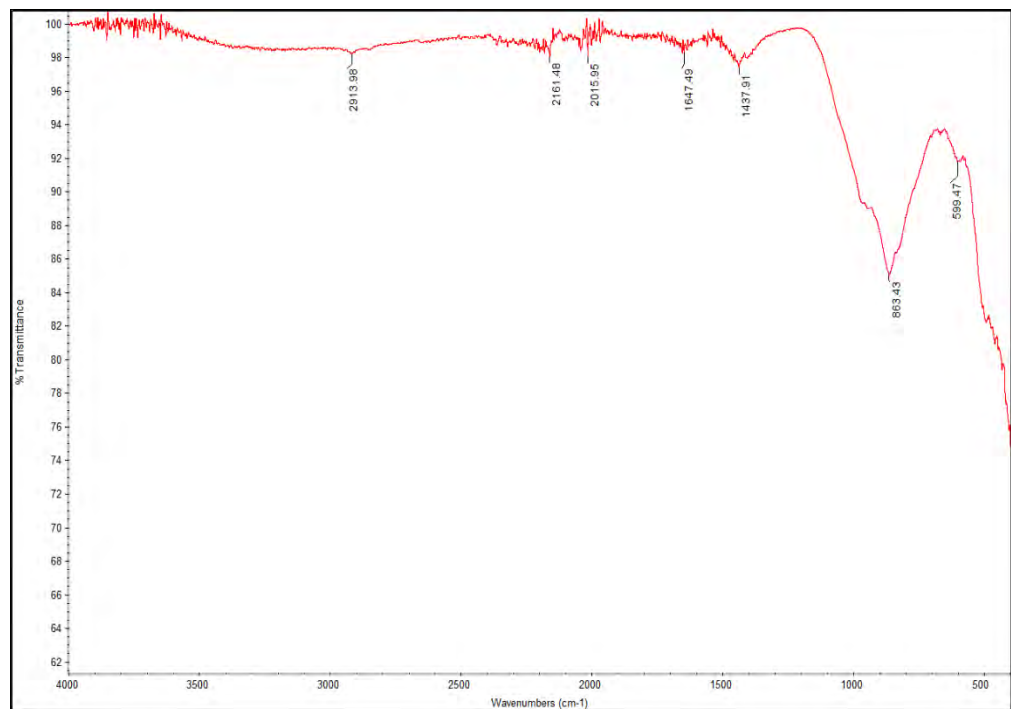
d. **Grafik FTIR Geopolimer pada Temperatur 70 °C dengan Waktu Curing 12jam**



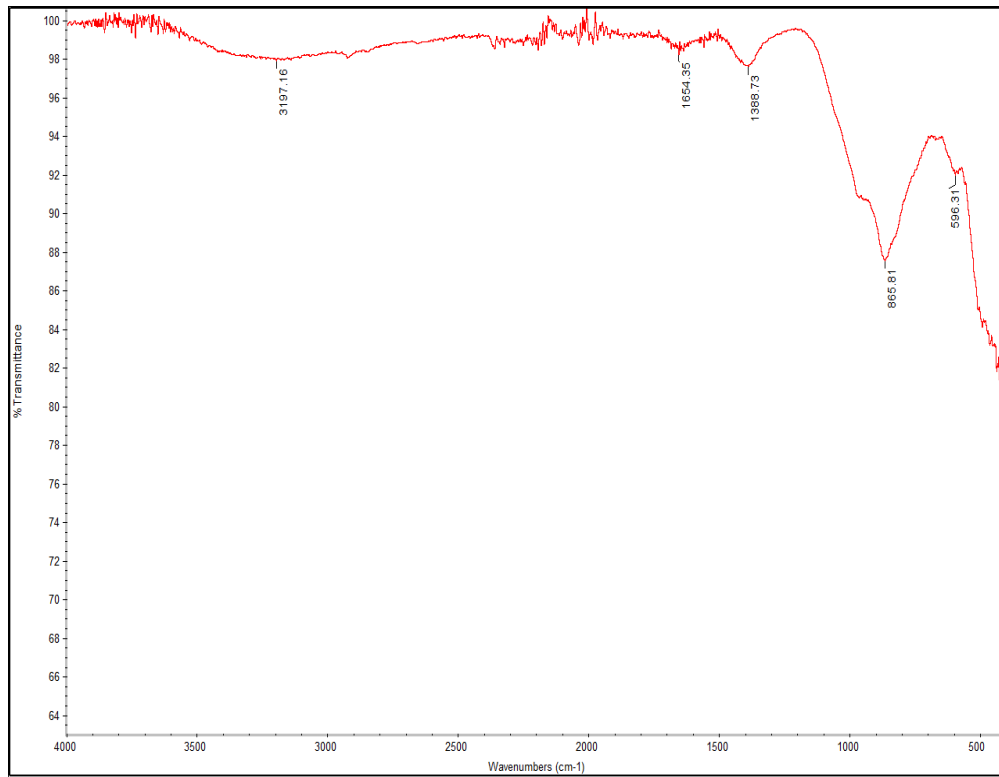
e. Grafik FTIR Geopolimer pada Temperatur 70 °C dengan Waktu *Curing* 24 jam



f. Grafik FTIR Geopolimer pada Temperatur 90 °C dengan Waktu *Curing* 12 jam



**g. Grafik FTIR Geopolimer pada Temperatur 90 °C dengan Waktu *Curing* 24 jam**



## BAB 5

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1 Kesimpulan

Sintesis geopolimer berbahan dasar *slag ferronickel* telah berhasil dilakukan melalui proses geopolimerisasi yang menggunakan larutan aktivator NaOH dan  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  dengan variasi temperatur dan waktu *curing*. Berdasarkan hasil yang telah diperoleh maka pada penelitian ini diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut :

1. Temperatur dan waktu *curing* pada proses geopolimerisasi dapat mempengaruhi struktur mikro geopolimer, dimana dengan meningkatkan temperatur dan waktu *curing* retakan-mikro pada permukaan geopolimer akan berkurang, akan tetapi peningkatan temperatur dan waktu *curing* juga dapat memicu terbentuknya pori dengan ukuran yang lebih besar.
2. Perubahan struktur mikro yang dibentuk akibat peningkatan temperatur dan waktu *curing* juga mempengaruhi sifat fisik-mekanik geopolimer, dimana nilai serapan air geopolimer semakin meningkat seiring dengan peningkatan temperatur dan waktu *curing* akibat dari munculnya pori dengan ukuran yang lebih besar sehingga mampu untuk menyerap air dalam jumlah yang lebih banyak.
3. Selain serapan air, sifat fisik berupa densitas juga dipengaruhi oleh temperatur dan waktu *curing*. Kenaikan temperatur dan waktu *curing* menyebabkan densitas mortar geopolimer mengalami penurunan akibat porositas yang semakin tinggi dalam mortar geopolimer, sementara densitas semen geopolimer tanpa memperhitungkan adanya pori menunjukkan nilai optimal pada temperatur 70 °C, hal ini karena pada temperatur ini proses polikondensasi berlangsung dengan baik sehingga jaringan aluminosilikat yang terbentuk lebih banyak dan meningkatkan densitas semen geopolimer.
4. Pengaruh temperatur dan waktu *curing* terhadap sifat mekanik berupa kekuatan tekan diperoleh bahwa kuat tekan geopolimer maksimum pada temperatur 70 °C dengan waktu *curing* 24 jam, hal ini karena pada kondisi ini jumlah gel aluminosilikat yang dihasilkan lebih banyak, retakan-mikro dalam geopolimer

berkurang (hilang), sedangkan pada kondisi temperatur 50 °C proses polikondensasi tidak berlangsung dengan optimal sehingga menyebabkan munculnya retakan mikro yang mengurangi kekuatan tekan geopolimer, selanjutnya pada temperatur 90 °C kekuatan tekan menurun akibat porositas yang tinggi sehingga geopolimer menjadi keropos dan lebih rapuh.

## 5.2 Saran

Mengingat banyaknya variabel dari proses sintesis geopolimer yang dapat mempengaruhi sifat fisik-mekanik geopolimer dan aplikasi yang beragam maka beberapa saran yang perlu di perhatikan untuk penelitian selanjutnya :

1. Kandungan unsur Si dan Al yang terdapat dalam bahan baku yang digunakan pada penelitian ini lebih rendah dibandingkan dengan bahan baku lain sehingga perlu dilakukan *treatment* terlebih dahulu untuk meningkatkan kadar Si dan Al sehingga dapat menghasilkan geopolimer dengan sifat fisik-mekanik yang lebih tinggi.
2. Selain temperatur dan waktu *curing* dalam proses sintesis geopolimer juga perlu memperhitungkan faktor lain seperti rasio Si/Al dan ukuran butir dari *slag ferronickel* untuk meningkatkan sifat fisik-mekanik geopolimer.
3. Dalam perencanaan untuk aplikasi geopolimer dengan sifat fisik-mekanik yang berbeda harus disesuaikan dengan lingkungan penggunaannya seperti kelembaban dan kandungan air untuk meningkatkan usia penggunaan geopolimer.

## DAFTAR PUSTAKA

- Abdel-Gawwad, H.A, Abo-el Enein, S.S. (2014), “A Novel Method to Produce Dry Geopolymer Cement Powder”, *Housing and Building National Research Center*, hal. 1-12.
- Aredes, F.G.M., Campos, T.M.B., Machado, J.P.B., Sakane, K.K., Thim, G.P., Bronelli, D.D. (2015), “Effect of Cure Temperature on The Formation of Metakaolinite-Based Geopolymer”, *Chemical International* ; Vol. 41, hal. 7302 -7310.
- Atiş, C.D., Görür, E.B., Karahan, O., Bilim, C., Ilkentapar, S., Luga, E. (2015), “Very High Strength (120 MPa) Class F Fly Ash Geopolymer Mortar Activated at Different NaOH Amount, Heat Curing Temperature and Heat Curing Duration”, *Construction and Building Materials*; Vol.96, hal. 673-678.
- Bakharev, T. (2005), “Durability of Geopolymer Materials in Sodium and Magnesium Sulfate Solution”, *Cemical Concrete Res*; Vol. 35(6):1233-46.
- Barati, M and Eshafani, S. (2011), “Energy Recovery from High Temperature Slag”, *Toronto, Canada*, hal. 5440-5441.
- Barbosa, V.F.F., MacKenzie, C., Thaumaturgo. (2000), “Synthesis and Characterisation of Materials Based on Inorganic Polymers of Alumina and Silica: Sodium Polysialate Polymers”, *International Journal of Inorganic Materials* Vol. 2 No.4, hal. 309-317.
- Bayuseno, AP., Widyanto, SA., Juwantono. (2011), “Synthesis and Characterisation of Materials Based on Inorganic Polymers of Alumina and Silica: Sodium Polysialate Polymers”, *Rotasi* – Vol. 12, No. 4, Oktober 2010, hal. 10–16.
- Bing-hui, M., Zhu., H., Xue-min, C., Yan, H., Si-yu, G. (2014), “Effect of Curing Temperature on Geopolymerization of Metakaolin-based Geopolymers”, *Applied Clay Science* ; Vol.99, hal.144-148.
- Callister,Jr, W.D., Rethwisch, D.G., (2009) “Materials Science and Engineering An Introduction 8<sup>Th</sup>”, *John Wiley & Sons, Inc.*, hal. 74-78.



- Cheng, T.W., and Chiu, J.P. (2003), “Fire-Resistant Geopolymer Produced by Granulated Blast Furnace Slag”, *Minerals Engineering*, Vol. 16, No. 3, hal. 205-210.
- Davidovits, J, (1991). “Geopolymers: Inorganic Polymeric New Materials”, *Thermal Analysis*, Vol. 37, hal. 1633–1656.
- Davidovits, J, (1994). “Properties of Geopolymer Cements”, *Proceeding First International Conference on Alkaline Cements and Concrete, Scientific Research Institute on Binder and Material*, Kiev State Technical University, Kiev, Ukraine.
- Davidovits, J. (1999), “Chemistry of Geopolymeric Systems, Terminology”, In: Davidovits, J., Davidovits, R., James, C., *Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Conference on Geopolymer’99*, Saint-Quentin, France, June 30-July 2, hal 9-39.
- Davidovits, J. (2002), “Personal Communication on the Process of Making of Geopolymer Concrete”.
- Davidovits, J. (2008), “Geopolymer Chemistry and Applications: A Practical and Scientific Approach to Sustainable Development, edisi 2<sup>nd</sup>”, *Institut Geopolymere*, France.
- Davidovits, J. (2011), “Geopolymer Chemistry and Applications 3<sup>rd</sup> edition”, *Intitute Geopolimere, Saint-Quentin*, France.
- Davidovits, J. (2013), “Geopolymer Cement a Review”, *Intitute Geopolimere, Saint-Quentin*, France, hal. 2-5.
- Elembe, A., Tchakoute, H.K., Njopwouo, D, (2011), “Effects of Calcination Temperature of Kaolinite Clays on The Properties of Geopolymer Cements”, *Construction and Building Materials*, Vol.25, hal. 2805-2811.
- El-Sahate, M. (2014), “Study Physic chemical Properties of Blended Cements Containing Fixed Mount of Silica Fume, Blast Furnace Slag, Basalt and Limestone, a comparative Study”, *Construction and Building Materials*, Egypt, hal. 104-105.
- Firdaus, A. (2007), “Proses Pembuatan Semen pada PT. Holcim Indonesia tbk”, *Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik Universitas Sultan Agung Tirtayasa*, Banten.

- Gimeno, D., Davidovits, J., Marini, C., Rocher, P., Tocco, S., Cara, S., Diaz, N., Segura, C and Sistu, G. (2003), "Development of Silicate-Based Cement from Glassy Alkaline Volcanic Rocks", Interpretation of Preliminary Data Related to Chemical- Mineralogical Composition of Geologic Raw Materials", *Paper in Spanish, Bol. Soc. Esp. Cerám. Vidrio*, Vol. 42, hal. 69–78.
- Gourley JT and Johson, GB. (2005), "Developments in Geopolymer Precast Concrete", *The International Workshop on Geopolymers and Geopolymer Concrete*. Perth, Australia.
- Hermansyah, M.F. (2008), "Pembuatan dan Karakterisasi Beton Geopolimer Berbahan Dasar Abu Terbang dan Abu Dasar sebagai Agregat Halus", *Universitas Indonesia*, Depok.
- Ibrahimi, I. (2007), "Ferronickel Slag Effect in Improvement Characteristics of Surface Layer Asphalt Concrete", *Fray International Symposium* Vol. 4, hal 335-336.
- Isawa, Tomo. (2013), "Update of Iron and Steel Slag I Japan and Current Development for Valorisation", *Slag Valorisation Symposium, Leuven*, Belgium. *Energy*, hal. 87-89.
- Izquierdo, M., Querol, X., Davidovits, J., Antenucci, D., Nugteren, H and Fernández, P.C. (2009), "Coal Fly Ash-Based Geopolymers: Microstructure and Metal Leaching", *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 166, hal. 561– 566.
- Kalinkin, A.M., Kumar, S., Gurevich, B.I., Alex, T.C., Kalinkina, E.V., Tyukavkina, V.V., Kalinnikov, V.T., and Kumar, R. (2012), "Geopolymerization Behavior of Cu-Ni Slag Mechanically Activated in Air and in CO<sub>2</sub> Atmosphere", *International Journal of Mineral Processing*, Vol. 112-113, hal. 101-106.
- Karakoc, M.B., Turkmen, I., Maras, M.M., Kantarci, F., Demirboga, R., Toprak, M.U, (2014), "Mechanical Properties and Setting Time of Ferrochrome Slag Based Geopolymer Paste and Mortar", *Construction and Building Materials*; Vol. 72, hal. 283-291.

- Ken,P.W., Ramli, M., Ban, C.C. (2015), “An Overview on The Influence of Various Factors on The Properties of Geopolymer Concrete Derived from Industrial By-Products”, *Construction and Building Materials*: 77, hal. 370–395.
- Komnitsas, K., Zaharaki, D., Perdikatsit, V. (2008), “Effect of Synthesis Parameter on the Compressive Strength of Low-Calcium Ferronickel Slag Inorganic Polymers”, *Applied Clay Science*, Vol. 73, hal. 760-761.
- Komnitsas, K., Zaharaki, D., Bartzas, G. (2012), “Effect of Sulphate and Nitrate Anions on Heavy Metal Immobilisation in Ferronickel Slag Geopolymers”, *Applied Clay Science*, Vol. 73, hal. 103-109.
- Lamond, J.F., and Pielert, J.H. (2006), “Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete-Making Materials STP 169D”, *ASTM International 100 Barr Harbor Drive*, hal. 436-448.
- Lemonis, N., Tsakiridis, P.E., Katsiotis, N.S., Antiohos, S., Papageorgiou, D., Beazi-Katsioti, M. (2015), “Hydration Study of Ternary Blended Cements Containing Ferronickel Slag and Natural Pozzolan”, *Construction and Building Materials* ; Vol. 81, hal. 130-139.
- Lemougna, P.N., MacKenzie,K.J.D., Melo, U.F.C. (2011), “Synthesis and Thermal Properties of Inorganic Polymers (Geopolymers) for Structural and Refractory Applications from Volcanic Ash”, *Ceramic International* ;37, hal. 3011–3018.
- Maragkos, I., Giannopoulou, I.P., Pnias, D. (2008), “Synthesis of Ferronickel slag-based Geopolymers”, *Minerals Engineering*, Vol. 22, hal. 196-203.
- Nasvi, M.C.M., Ranjith, P.G., Sanjayan, J., Bui, H, (2013), “Effect of Temperature on Permeability of Geopolymer : A Primary Well Sealant for Carbon Capture and Storage Wells”, *Fuel*; Vol. 117, hal. 345-362.
- Nazari, A. (2012) “Compressive Strength of Geopolymers Produced by Ordinary Portland Cement: Application of Genetic Programming for Design”, *Materials and Design*, vol. 43, hal. 356–366.
- Oh, E.J., Monteiro, P.J.M., Jun, S.S., Choi, S., Clark, S.M, (2010), “The Evolution of Strength and Chrystalline Phase for Alkali-Activated Ground Blast

- Furnace Slag and Fly Ash-Based Geopolymers”, *Cement and Concrete Research*; Vol.40, hal. 189-196.
- Ozer, I dan Soyer-Uzun, S. (2015), “Relation Between The Structural Characteristics and Compressive Strength in Metakaolin Based Geopolymers with Different Molar Si/Al Ratios”, *Ceramics International*; Vol. 41, hal. 10192-10198.
- Palomo, A., Grutzeck, M.W. and Blanco, M.T. (1999), “Alkali-activated fly Ashes: a Cement for the Future”, *Cement Concrete Res*, Vol. 29, hal. 1323–1329.
- Palomo, A., A. Fernandez-Jimenez, C. Lopez-Hombrados, J.L. Lleyda. (2004) “Precast Elements Made of Alkali-Activated Fly Ash Concrete”, *Eighth CANMET/ACI International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete*, Las Vegas, USA.
- Pontikes,Y; Machiels,L. (2012), “Slags with a High Al and Fe Content as Precursor for Inorganic Polymers”, *Applied Clay*, Belgium, hal.93-94.
- Pratapa, S. (2004). “Prinsip-prinsip dan Implementasi Metode Rietveld untuk Analisa Data Difraksi”. Surabaya: ITS.
- Ranjbar, N., Mehrali, M., Alengaram, U.J., Metselaar, H.S.C, (2014), “Compressive Strength and Microstructural Analysis of Fly Ash/Palm oil Fuel Ash Based Geopolymer Mortar Under Elevated Temperatures”, *Construction and Building Materials*; Vol. 65, hal. 114-121.
- Rovnaník, P, (2010), “Effect of Curing Temperature on The Development of Hard Structure of Metakaolin-Based geopolymer”, *Construction and Building Materials*; Vol. 24, hal. 1176-1183.
- Sakoi, Y., Aba, M., Tsukinaga, Y., and Nagataki, S. (2011), “Properties of Concrete used in Ferronickel Slag Aggregate”, *Hachinohe Institute of Tehnology*, Japan.
- Sonafrank, T., Watanabe, K. (2010), “ Investigating 21<sup>st</sup> Century Cement Production in Interior Alaska Using Alaskan Resources”, *Cold Climate Housing Research Center*, Fairbanks.
- Song XJ, Marosszeky, Brugs MM, Mun R. (2005), “Durability of fly ash-based Geopolymer Concrete against Sulphuric Acid Attack”. *The 10DBMC*

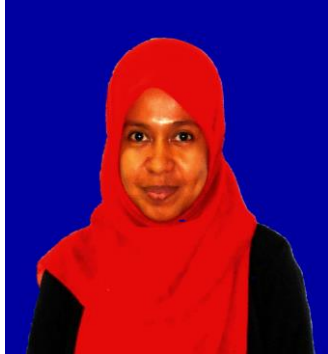
*International Conference on Durability of Building Materials and Components*, Lyon, France.

- Stuart, Barbara. (1996), "Modern Infrared Spectroscopy", *ACOL Series*, Wiley, Chichester, UK, University of Greenwich, hal. 18-43.
- Swaddle, T.W and North, M.R. (2000). "Kinetics of Silicate Exchange in Alkaline Aluminosilicate Solutions", *Inorg. Chem.*, Vol. 39, hal. 2661–2665.
- Swanepoel JC, Strydom CA. (2002), "Utilisation of fly ash in Geopolymeric Material", *Appl. Geochem.* Vol. 17 (8) : 1143-8.
- Syarif Nirwan. (2010), "Karakterisasi Sifat Kimia Fisika Terak Pengolahan Bijih Besi Sebagai Pencampur Mortar/ Bahan Keramik", *Jurnal Teknologi Pengelolaan Limbah (Journal of Waste Management Technology)*, ISSN 1410-9565 Vol. 13, No.2.
- Temuujin, J., A. van Riessen, R. Williams. (2009), "Influence of Calcium Compounds on The Mechanical Properties of Fly Ash Geopolymer Pastes", *Journal of Hazardous Materials*, Vol :167, hal. 82–88.
- Van Jaarsveld, J.G.S., van Deventer, J.S.J. and Lorenzen L. (1997), "The Potential Use of Geopolymeric Materials to Immobilize Toxic Metals: Part I. Theory and Applications", *Minerals Engineering*, Vol. 10 No. 7, hal. 659–669.
- Wallah SE, Rangan BV. (2006), "Geopolymer Concrete: Long Term Properties. Research Report", University of Curtin.
- Wang, George. (2010), "Determination of The Expansion Force of Coarse Steel Slag Aggregate", *Construction and Building Materials* 24, East Carolina University, Greenville USA, hal. 1964.
- Xu, H., van Deventer, J.S.J. (2002), "Geopolymerisation of Multiple Minerals", *Mineral Engineering*, Vol. 15, hal. 1131-1139.
- Xie, Jiting dan Kayali, Obada. (2014), "Effect of Initial Water Content and Curing Moisture Conditions on The Development of Fly Ash-Based Geopolymers in Heat and Ambient Temperature", *Construction and Building Materials*, Vol. 67, hal. 20–28.
- Yang, T., Yao, X., Zhang, Z. (2014), "Geopolymer Prepared with high-magnesium Nickel Slag: Characterization of Properties and Microstructure", *Construction and Building Materials*, Vol. 59, hal. 188-194.

Zoulgami, M; Lucas-Girot, A.; Michaud, V.; Briard, P.; Gaudé, J. and Oudadesse, H. (2002), “Synthesis and Physico-Chemical Characterization of a Polysialate-hydroxyapatite Composite for Potential Biomedical Application”, *Eur. Phys. J. AP*, Vol. 19, hal. 173-179.

*(halaman ini sengaja dikosongkan)*

## BIODATA PENULIS



Penulis bernama Yulianti Malik merupakan anak ke tiga dari enam bersaudara yang lahir di Kota Raha pada 1 Juli 1983. Penulis menempuh pendidikan formal antara lain di SD Negeri 15 Raha, SLTP Negeri 2 Raha, dan SMA Negeri 1 Raha dan melanjutkan studi untuk jenjang S1 di Jurusan Fisika FMIPA Universitas Haluoleo-Kendari.

Pada tahun 2014 penulis melanjutkan pendidikan hingga 2016 di Program Studi Magister Jurusan Teknik Material dan Metalurgi, Fakultas Teknologi Industri (FTI) Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya melalui beasiswa *Pra-S2 Saintek* oleh DIKTI. Hidup itu adalah buku terbaik dan kehidupan adalah gurunya, apa yang diperoleh dan apa yang dimiliki adalah hal penting tapi bukan yang utama karena juara sejati adalah dia yang terus memperbaiki diri untuk menjadi lebih baik serta mampu memberi manfaat dalam kebaikan. Akhir kata, sekiranya ada kritik dan saran dapat disampaikan melalui surat elektronik melalui : [yulianti\\_malik@yahoo.com](mailto:yulianti_malik@yahoo.com).